la construction chaudronnée en acier inoxydable

UGINOX

UGINE KUHLMANN
aciers spéciaux

UGINE KUHLMANN (Division Aciers Spéciaux)
10, rue du Général-Foy - PARIS 8e - Tél.: 387-31-00

UGINE-GUEUGNON (Les Tôles Inoxydables et Spéciales)
16, rue d'Artois - PARIS 8e - Tél.: 359-79-69

CENTRE TECHNIQUE
39, rue Pleyel - 93-SAINT-DENIS - Tél.: 243-01-23

CENTRE DE RECHERCHES MÉTALLURGIQUES
UGINE (Savoie)

la construction chaudronnée en acier inoxydable

UGINOX

UGINE KUHLMANN
aciers spéciaux

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 7

Première partie

PRINCIPALES NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES

Chapitre I DÉFINITION DES ACIERS INOXYDABLES . . . 15

Chapitre II LES DIFFÉRENTS TYPES D'ACIERS INOXYDABLES 18

Chapitre III LES ACIERS INOXYDABLES UTILISÉS A LA TEMPÉRATURE AMBIANTE 22

Chapitre IV LES ACIERS ET ALLIAGES INOXYDABLES UTILISÉS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES . . . 28

Chapitre V UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES AUX BASSES TEMPÉRATURES 33

Conclusion 38

Deuxième partie

PROPRIÉTÉS DES ACIERS INOXYDABLES

Chapitre VI CORROSION EN MILIEU LIQUIDE 44

1 - Nature de la corrosion 44

2 - Phénomènes de passivité 46

3 - Différents types de corrosion 48

Chapitre VII CORROSION EN MILIEUX GAZEUX, VISQUEUX OU LIQUIDES AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES. 50

1 - Températures peu élevées 50

2 - Températures élevées 50

a) Milieux gazeux 50

b) Milieux visqueux ou solides 51

c) Milieux liquides 52

Chapitre VIII DÉTERMINATION QUANTITATIVE DE LA CORROSION 53
Tables de corrosion. 53

Chapitre IX PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ACIERS INOXYDABLES 55

Chapitre X PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ACIERS INOXYDABLES 56
1 - Mesure des caractéristiques mécaniques conventionnelles 57
a) Charge de rupture et limite d'élasticité 57
b) Aciers ferritiques et martensitiques 58
c) Aciers austénitiques 60
— *Limite conventionnelle*. 60
— *Influence de l'écrouissage*. 63
2 - Comportement mécanique des aciers inoxydables austénitiques 64
a) Diagramme rationnel de traction 64
b) Effet d'une précontrainte 67
c) Utilisation pratique. 68
3 - Variation des caractéristiques mécaniques avec la température 70
4 - Résistance mécanique aux températures élevées 72
a) Caractéristiques de tenue mécanique :
— *Traction rapide* 72
— *Fluage*. 72
b) Caractéristiques de ductilité :
— *Ductilité à chaud* 73
— *Ductilité à froid après service à chaud* 73
c) Résistance aux sollicitations alternées 75
d) Rupture à temps 76

Conclusion 79

Troisième partie

TECHNOLOGIE DE LA MISE EN ŒUVRE DES ACIERS INOXYDABLES

Chapitre XI GÉNÉRALITÉS SUR LA TECHNOLOGIE 83
1 - Matières utilisées et états de surface 83
2 - Propriétés fondamentales 84
a) Résistance à la corrosion 84
b) Aptitude au formage 85
c) Aptitude au soudage 85
d) Aptitude au polissage 87

3 - Opérations préliminaires 88
a) Magasinage et manutentions 88
b) Traçage et découpage 88
4 - Techniques d'assemblage. 92

Chapitre XII MISE EN FORME 94
1 - Conformation à froid 94
— *Pliage - Roulage - Formage* 95
— *Emboutissage des fonds* 96
— *Fluotournage* 97
2 - Conformation à chaud. 97

Chapitre XIII MÉTAUX D'APPORT POUR LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES 99
1 - Soudage des aciers martensitiques à 13 % de chrome . 99
2 - Soudage des aciers ferritiques à 17 % de chrome . . . 99
3 - Soudage homogène des aciers austénitiques. 101
— *Fissuration à chaud*. 101
— *Tendance ferritique du métal d'apport* 102
— *Rôle de la ferrite*. 105
— *Influence du manganèse* 106
— *Cas particuliers* 106
4 - Soudages hétérogènes 106
5 - Revêtements par dépôt 107

Chapitre XIV CORROSION DES CORDONS DE SOUDURE . . 108

Chapitre XV PROCÉDÉS DE SOUDAGE 110
1 - Soudage à l'électrode enrobée. 110
2 - Procédé TIG 112
3 - Procédé MIG 114
4 - Soudage sous flux solide 115
5 - Pointage TIG 116
6 - Soudage par résistance. 116
7 - Brasage à l'argent 117
8 - Tendances nouvelles. 118

Chapitre XVI OPÉRATIONS DE FINITION 119
1 - Décapage des cordons de soudure 119
2 - Passivation - Décontamination 120
3 - Traitements thermiques de l'appareil chaudronné . . . 120
4 - Meulage - Polissage 121

Chapitre XVII USINAGE DES ACIERS INOXYDABLES 122

Conclusion 124

Quatrième partie

CONCEPTION DES APPAREILS CHAUDRONNÉS EN ACIER INOXYDABLE

Chapitre XVIII CHOIX DE L'ACIER 129
1 - Les critères du choix 129
2 - Influence des propriétés physiques. 129
3 - Influence du comportement mécanique. 130
4 - Pollution et détérioration des produits 130
5 - Influence de la résistance à la corrosion 131
a) Reconduction ou modifications d'installations existantes 131
b) Installations - pilotes 132
c) Installations nouvelles. 132

Chapitre XIX CALCUL ET TRACÉ DES PIÈCES 135
1 - Principes de base et paramètres du calcul 135
2 - Étude particulière du taux de travail prévisible T . . . 137
3 - Étude particulière de la position des lignes d'assemblage A. 137
4 - Étude particulière du taux de travail admissible N. . . 137
a) Aciers ferritiques et martensitiques 139
b) Aciers et alliages austénitiques 139
c) Aciers et alliages de fluage. 139
5 - Étude particulière du coefficient de joint α 140
6 - Étude particulière de la surépaisseur de corrosion c . . 140
7 - Cas des pièces travaillant en compression 140
8 - Utilisation d'aciers écrouis 141
9 - Paramètres techniques du tracé 142
a) Résistance à la corrosion 142
b) Techniques de soudage 145
c) Assemblages hétérogènes 145
10 - Paramètres économiques du tracé 145

Chapitre XX INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES . 147
1 - Engineering 147
2 - Fournitures 150
3 - Mise en œuvre 153
4 - Utilisation de l'appareil 153

Cinquième partie

EXEMPLES CARACTÉRISTIQUES D'EMPLOI DES ACIERS INOXYDABLES

Chapitre XXI MILIEUX SPÉCIFIQUES 158
1 - Eaux et vapeur d'eau 158
2 - Acides et produits minéraux 160
3 - Acides organiques. 161
4 - Produits organiques 162
5 - Solutions alcalines 162
6 - Solutions salines 163

Chapitre XXII DOMAINES INDUSTRIELS 164
1 - Industrie pharmaceutique 164
2 - Industrie photographique 164
3 - Industrie nucléaire 164
4 - Industrie papetière 164
5 - Industrie pétrolière 167
6 - Fours industriels 167
7 - Industrie textile. 167
8 - Industries alimentaires. 167
— *Laiterie*. 167
— *Industrie vinicole et des jus de fruits* 168
— *Brasserie* 168
— *Abattoirs* 168
9 - Matériel de transport 169

Sixième partie

LE TITANE MÉTAL COMPLÉMENTAIRE DE L'ACIER INOXYDABLE

1 - Résistance à la corrosion. 174
2 - Propriétés mécaniques 176
3 - Principales utilisations. 178
4 - Mise en œuvre 180
a) Conformation 182
b) Décapage 183
c) Soudage 184

Septième partie

RENSEIGNEMENTS UTILES

Chapitre XXIII AGENCES DE VENTE ET MAGASINS 191
— Produits disponibles 191

Chapitre XXIV UNITÉS DE MESURE. 193
— Système international. 193
— Unités anglo-saxonnes 196

Chapitre XXV TABLEAUX. 200

A - **Utilisation des aciers inoxydables** 201

1 - Tables de corrosion 201

2 - Correspondance des nuances UGINE avec la normalisation américaine AISI 213

3 - Correspondance des nuances UGINE avec le Code WERKSTOFF et avec la normalisation provisoire allemande VORNORM 214

4 - Correspondances des normes françaises, allemandes, américaines et britanniques. 215

B - **Comparaison des constantes physiques et mécaniques des principaux matériaux** 217

1 - Principales caractéristiques physiques des métaux et éléments usuels. 217

2 - Analyses des principales nuances d'aciers au carbone. 218

3 - Analyses des principales nuances d'aciers inoxydables. 219

4 - Analyses des principaux alliages de titane, d'aluminium, de cuivre et de zinc 220

5 - Propriétés physiques à la température ambiante (20°C) des aciers au carbone, des aciers inoxydables, du titane et de ses alliages et des alliages d'aluminium, de cuivre et de zinc 222

6 - Caractéristiques mécaniques à 20 °C des aciers au carbone, des aciers inoxydables, du titane et de ses alliages et des principaux alliages d'aluminium, de cuivre et de zinc. 224

7 - Propriétés physiques de quelques matériaux non métalliques 226

8 - Caractéristiques mécaniques des verres. 227

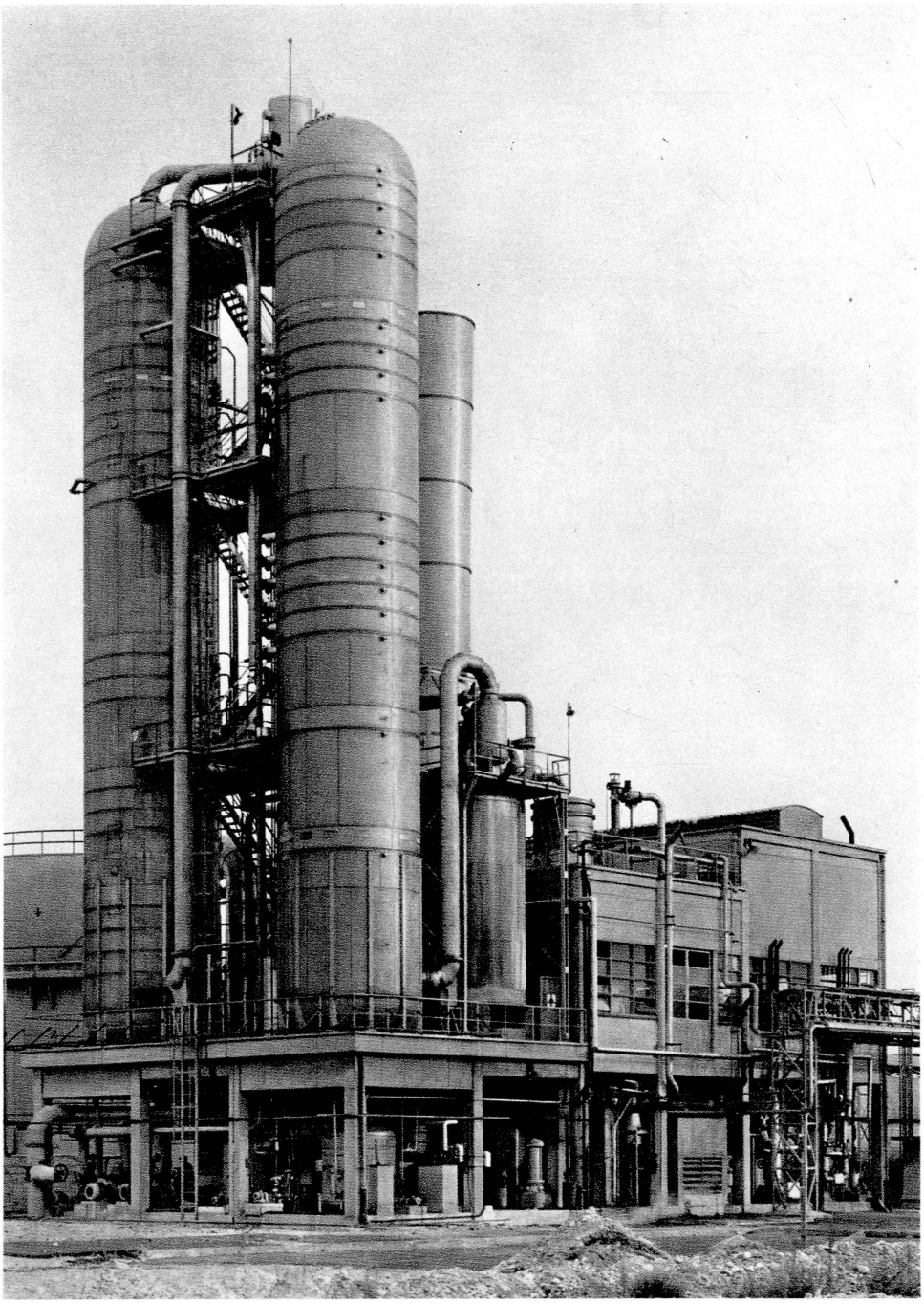
9 - Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des bois. 227

C - **Renseignements métallurgiques** 229
1 - Comparaison des échelles de dureté (jusqu'à Brinell 430) 229
2 - Comparaison des échelles de dureté (au-dessus de Brinell 400) 230
3 - Plats en acier (poids spécifique 7,85) - Poids d'un mètre en kg 231
4 - Plats en acier (poids spécifique 7,85) - Mesures en pouce anglais - Poids d'un mètre en kg 232
5 - Barres rondes, carrées et hexagonales en acier (poids spécifique 7,85) - Poids d'un mètre en kg 233
6 - Tôles planes en acier inoxydable - Poids en kg pour 1 m^2 234
7 - Tubes en acier inoxydable austénitique - Poids d'un mètre en kg 235

D - **Renseignements techniques généraux** 237
1 - Alphabet grec 237
2 - Constantes mathématiques 237
3 - Conversion des unités de mesures anglaises en unités métriques 238
4 - Conversion des degrés Celsius en degrés Farenheit . 239
5 - Conversion des livres anglaises (pounds) en kilogrammes 242
6 - Conversion des pieds anglais (feet) en mètres 243
7 - Conversion des millimètres en fractions décimales de pouce anglais 244
8 - Conversion des fractions décimales de pouce anglais en millimètres 244
9 - Conversion des fractions de pouce anglais en valeurs décimales et en millimètres 245
10 - Conversion de pouces carrés en centimètres carrés . . . 246
11 - Conversion de pouces cubes en centimètres cubes . . . 247
12 - Conversion de pieds cubes en mètres cubes 248
13 - Conversion des valeurs de pression (kilogramme-force/mm^2) en tonnes anglaises par pouce carré (ton per square inch: t/sq.in) 249
14 - Conversion des valeurs de pression (kilogramme-force/mm^2) en livres anglaises par pouce carré (psi) . . 250
15 - Conversion des hectobars en livres anglaises par pouce carré (psi) 251
16 - Conversion des tonnes anglaises par pouce carré (t/sq.in) en kilogramme-force/mm^2 252
17 - Conversion des valeurs de pression en livre anglaise par pouce carré en kilogramme-force/mm^2 et en hectobar 253
18 - Conversion des jauges d'épaisseur (américaines et anglaises) en millimètres 254

LA CONSTRUCTION CHAUDRONNÉE EN ACIER INOXYDABLE

DOCUMENT UGINE KUHLMANN



COLONNE D'ABSORPTION D'ACIDE NITRIQUE
ACIERS 18-10 (NS 21 S ET NS 22 S)

La chaudronnerie est une industrie de base d'une extrême variété, car chaque construction est un cas d'espèce.

L'utilisation des aciers inoxydables en chaudronnerie n'est pas une transposition pure et simple des méthodes classiques employées avec l'acier ordinaire; elle nécessite une certaine technicité et quelques précautions dues à leur nature et à leurs propriétés.

Devant une clientèle soucieuse d'assurer à ses équipements rentabilité et fiabilité, le chaudronnier, en raison de la compétition internationale, doit entrer dans la voie de la spécialisation et de la pratique des technologies nouvelles.

Les études du Syndicat National de la Chaudronnerie, de la Tôlerie et de la Tuyauterie industrielle montrent qu'une telle spécialisation évolue dans trois directions :

— mise en œuvre d'appareils de plus en plus complexes et pesants,

— fabrications réclamant une précision accrue et une sécurité totale,

— utilisation de matières premières posant des problèmes techniques.

Aussi faut-il s'attendre à une extension de la chaudronnerie d'acier inoxydable qui s'est déjà affirmée comme facteur de progrès dans des applications maintenant classiques, spécialement dans tout ce qui touche à l'industrie chimique et pétrochimique, à l'industrie alimentaire et à l'industrie des transports, en raison des propriétés avantageuses de ce métal.

D'après le Syndicat National de la Chaudronnerie, la consommation annuelle en produits sidérurgiques de ses ressortissants était en 1957 légèrement inférieure à 400.000 tonnes dont 3 % d'aciers inoxydables. Cette consommation, après avoir augmenté jusqu'en 1965, s'est stabilisée et en 1967 elle s'était accrue de plus de 10 % par rapport à 1957.

Durant le même temps, la part des aciers inoxydables n'a cessé de croître, comme en témoignent les valeurs suivantes :

- 1959 2,5 %
- 1960 4 %
- 1961 4,5 %
- 1962 5 %
- 1963 6 %

et • 1967 7 %

En tenant compte de tonnages non recensés par le Syndicat National de la Chaudronnerie, on peut estimer qu'en 10 ans la consommation de l'ensemble des aciers inoxydables en chaudronnerie a été multipliée par au moins deux et demi.

Rappelons que la consommation globale des aciers inoxydables sur le marché industriel français a doublé en 5 ans depuis 1962.

De nombreuses professions sont clientes de l'industrie de la chaudronnerie et les principales, au regard de la consommation en aciers ordinaires et alliés, sont :

— Chimie et Pétrochimie pour 20 %,
— Pétrole, Gaz naturels, Carburants pour 18 %,
— Énergie nucléaire, Électricité pour 15 %,

soit plus de la moitié de la consommation française, les produits exportés représentant environ 10 % du chiffre d'affaires total.

Mais sur le tonnage d'aciers inoxydables utilisé en chaudronnerie en 1968, environ 70 % vont à l'Industrie Chimique et plus de 20 % à l'Industrie Alimentaire.

Le fait « acier inoxydable » est dans les préoccupations de la profession puisqu'un groupe de travail de la Commission Technique Générale du Syndicat étudie les problèmes relatifs à l'emploi des aciers inoxydables austénitiques, dont une meilleure connaissance des propriétés, des conditions d'emploi et de la mise en œuvre devrait conduire à des allégements dans la construction chaudronnée, tout en respectant les impératifs de sécurité.

Les augmentations de volume des appareils, les accroissements des températures et des pressions, les effets de corrosion qui peuvent se manifester constituent les problèmes auxquels ont souvent à faire face actuellement les constructeurs. Les aciers inoxydables permettent de résoudre l'ensemble de ces exigences d'une façon à la fois économique pour le constructeur et rentable pour l'utilisateur.

La Société UGINE KUHLMANN a cru utile pour une profession de cette importance, d'apporter sa contribution à une meilleure connaissance de l'emploi des aciers inoxydables en chaudronnerie. Elle espère qu'en résultera un développement dans l'intérêt de tous.

DOCUMENT RHONE-POULENC

COLONNES D'UNE INSTALLATION PÉTROCHIMIQUE
POUR LA FABRICATION DE PRODUITS ORGANIQUES DE SYNTHÈSE
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

INTRODUCTION

LES TECHNIQUES DU CHAUDRONNIER

Dire d'un appareil qu'il est chaudronné c'est, avant toute chose, indiquer comment il est fabriqué. Le même vocable d'appareil chaudronné s'applique à des objets dont la fonction, la forme et la taille sont d'une grande variété, mais qui ont en commun d'avoir été réalisés à partir de tôles par des opérations de découpage, de conformation et d'assemblage.

C'est du moins ce qui caractérise l'essentiel des techniques du chaudronnier, car si la tôle est la matière première principale des appareils chaudronnés, elle y est bien souvent associée à des éléments fabriqués à partir de tubes, de barres, de profilés, de pièces forgées ou moulées, voire à des éléments non métalliques.

Constructeur d'appareils souvent prêts à l'emploi, le chaudronnier, dans bien des cas, en est aussi le créateur, lorsque l'utilisateur, n'imposant que des caractéristiques fonctionnelles, lui laisse le maximum d'initiatives et de responsabilités dans le domaine de la conception et du calcul.

VARIÉTÉ DES APPAREILS CHAUDRONNÉS

L'appareil chaudronné le plus simple est le réservoir qui comporte deux fonds, une virole et un certain nombre de piquages. C'est le type d'appareil qui a fait l'objet de codifications les plus détaillées en matière de calcul.

Les appareils chaudronnés peuvent être de simples récipients, des trémies, des cuves ou au contraire des appareils actifs, sièges de réactions chimiques, de phénomènes physiques, d'échanges thermiques, de réactions nucléaires, de phénomènes électroniques, des appareils de transport, de mélange ou de séparation de matériaux, etc. Bien qu'ils n'aient pas vocation de récipients, des appareils variés, tels que ventilateurs, pompes, vannes, cônes déflecteurs, pièces de fours, éléments de réacteurs d'aviation, candélabres urbains, sont des appareils chaudronnés, si tel est leur mode de fabrication.

IMPORTANCE DU MATÉRIAU DE CONSTRUCTION

L'appareil chaudronné est caractérisé par des parois minces en regard de son encombrement général. Ces parois devront participer à la fonction assignée à l'appareil, par leurs propriétés physiques et mécaniques. Elles devront, au surplus, n'être ni le siège, ni le catalyseur de réactions chimiques ou électrochimiques, lorsqu'elles sont mises au contact des milieux environnants; ces réactions doivent être très limitées pour trois raisons essentielles :

— Bien d'équipement, l'appareil chaudronné est fait pour durer et, parce que fait d'une enveloppe mince, il ne doit évidemment pas être dénaturé par son environnement.

— Il ne doit pas non plus polluer cet environnement par des produits indésirables résultant de cette attaque.

— Il ne doit pas enfin retenir à sa surface de dépôts provenant de l'environnement et qui seraient susceptibles d'induire, par leur présence ou leur évolution, des conditions nocives ou dangereuses de fonctionnement.

Aussi, le chaudronnier devra apprécier en conséquence le métal qu'il lui faudra utiliser et tenir compte de la possibilité et du coût de la mise en œuvre.

POSITION DES ACIERS INOXYDABLES EN CHAUDRONNERIE

Les aciers inoxydables, considérés de ce double point de vue, devaient tout naturellement trouver une place de choix dans la chaudronnerie puisqu'ils apportent des solutions aux problèmes de corrosion, ont de remarquables propriétés mécaniques et sont des matériaux formables et soudables. Ils permettront d'aboutir à des solutions avantageuses par rapport aux autres possibilités techniquement équivalentes.

Le chaudronnier utilisant l'acier inoxydable est de nos jours le praticien d'une technique maintenant au point, grâce à laquelle il peut asseoir le succès et la rentabilité de ce qu'il entreprend.

Le Centre Technique de la Division " Aciers Spéciaux " d'UGINE KUHLMANN a étudié les problèmes que pose cette technique et spécialement les conditions particulières de mise en œuvre qui sont accessibles à tous les chaudronniers ayant la pratique de la chaudronnerie de qualité. Il peut se mettre à la disposition de tous ceux qui désirent se renseigner sur l'utilisation des aciers inoxydables.

ÉVOLUTION DE LA CHAUDRONNERIE EN ACIER INOXYDABLE

L'évolution des techniques se fait logiquement dans le sens favorable aux améliorations d'ordre économique, dont l'un des facteurs est l'amélioration de la qualité des aciers utilisés, obtenue par les métallurgistes et dont bénéficient les chaudronniers.

Les aciers inoxydables se prêtent en chaudronnerie à des emplois très divers et leur évolution dans cette profession va dans le sens d'utilisations toujours plus larges et plus variées, en particulier dans les industries chimiques pour la plupart des produits minéraux et organiques.

Les principaux liquides alimentaires : lait, vins, alcools, jus de fruits, eaux minérales sont traités, contenus et transportés dans des appareils en

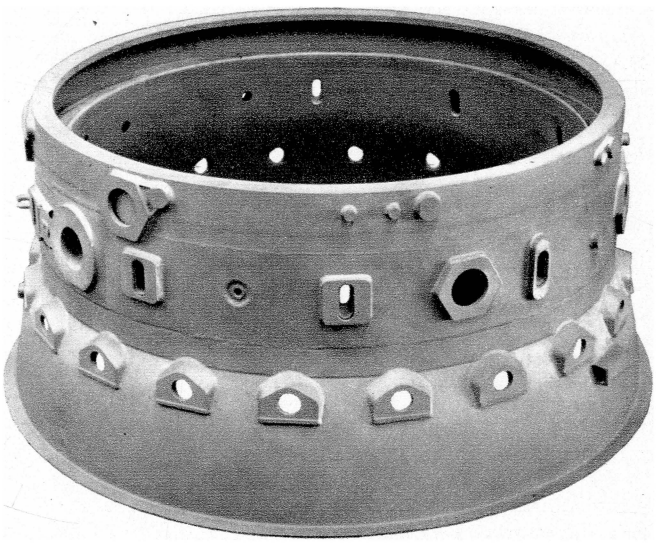
aciers inoxydables qui sont choisis en raison des possibilités de nettoyage et de stérilisation qu'ils offrent. Par ailleurs, ils ne communiquent aux liquides alimentaires aucune altération ou modification de goût et de couleur.

Pour les produits pharmaceutiques souvent très peu corrosifs, mais qui doivent rester rigoureusement exempts de certaines impuretés, l'emploi des aciers inoxydables permet de les traiter de façon à ce qu'ils restent constamment identiques à eux-mêmes.

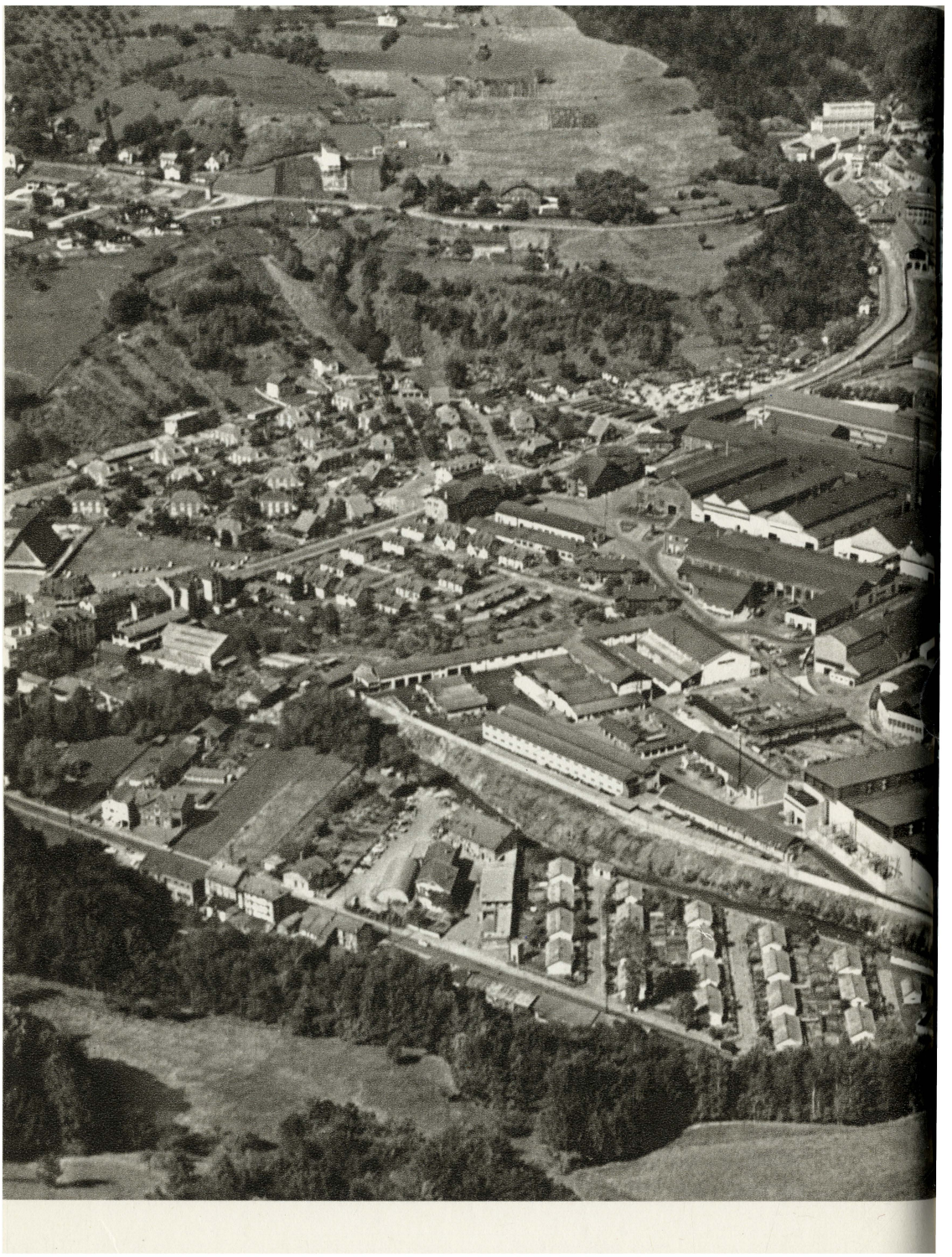
Enfin, pour les produits solides, pulvérulents ou non, le matériel de stockage ou de transport en aciers inoxydables procure une surface qui facilite le glissement des produits et résiste à l'usure.

Les problèmes techniques qui se sont posés et qui ont été résolus constituent un ensemble de cas particuliers; en effet, non seulement il a fallu tenir compte des produits traités, mais des méthodes employées pour ce traitement d'où découlent la forme des appareils, les vitesses de circulation, la disposition des conduites, les températures à observer et tout élément d'ordre physique et chimique nécessaire pour que les conditions les meilleures de production ou de transport soient obtenues.

Des exemples caractéristiques d'emploi des aciers inoxydables sont donnés en cinquième partie, page 155. Auparavant, vont être définies les caractéristiques des aciers inoxydables, leurs propriétés fondamentales, la façon de les mettre en œuvre, les méthodes de conception des appareils et toutes les données qui permettent d'en faire le choix qui convient.



CARTER CENTRAL DE RÉACTEUR ATAR 9
ACIER AUSTÉNITIQUE FLUGIVAC 130



USINE D'UGINE

Première partie

PRINCIPALES NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES

PHOTO ISO - BORDEAUX

RÉACTEUR DE 7.500 LITRES
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

Chapitre I

DÉFINITION DES ACIERS INOXYDABLES

Les premières compositions des aciers inoxydables, qui datent du début du siècle, ont été signalées simultanément à la même époque par Guillet et Portevin en France, Giesen et Monnartz en Allemagne; leur développement est lié à la découverte des remarquables propriétés conférées au fer par une addition suffisante de chrome, faisant acquérir au métal, dans de très nombreux milieux chimiquement agressifs, ce qu'on a appelé la passivité.

La dénomination « Aciers inoxydables » est très restrictive ainsi que les dénominations usuelles anglaise (Stainless steels : aciers intachables) ou allemande (Nichtrostende Stahl : aciers ne rouillant pas) et s'est imposée au début de leur développement, une des propriétés les plus évidentes étant leur résistance à la corrosion atmosphérique.

Cette dénomination se rapporte aujourd'hui à des aciers présentant, par rapport à des milieux liquides ou gazeux dans des limites de température étendues, des propriétés de résistance à l'attaque ou à la corrosion chimique hors de proportion avec celles des aciers ordinaires ou des aciers spéciaux à faibles teneurs en éléments d'alliages.

Lorsqu'on ajoute au fer des quantités de chrome en proportion croissante, on constate que la résistance à la corrosion atmosphérique augmente rapidement avec la teneur en chrome et devient excellente lorsqu'on dépasse environ 12 % de chrome. Le tableau ci-après illustre, d'après Francks et Binder, la vitesse de corrosion en milligramme par dm^2 et par 24 heures d'échantillons d'alliages fer-chrome exposés pendant 600 jours à différentes atmosphères.

CORROSION ATMOSPHÉRIQUE DES ACIERS AU CHROME DANS DIFFÉRENTES ATMOSPHÈRES

Teneurs en Cr des alliages Fe Cr	Atmosphère urbaine (New York)	Atmosphère industrielle (Niagara Falls)	Atmosphère marine (Wilmington)
Acier doux non allié	12,9	5,36	7,90
1 %	16,2	4,45	6,70
2 %	11,35	3,54	5,50
3 %	3,68	2,93	4,44
5 %	2,60	2,70	5,0
7 %	3,33	2,40	2,78
9 %	2,61	0,97	2,49
12 %	0,005	0,42	0,20
18 %	0,008	0,05	0,04

(Un taux de corrosion de 1 mg par dm^2 et par 24 heures correspond à 0,004 mm par an).

D'où provient l'inoxydabilité? On sait que le fer, plongé dans l'acide nitrique très concentré ne se corrode pratiquement pas: on dit qu'il est passif; sa surface est recouverte d'un film invisible et très mince, contenant de l'oxygène.

Le phénomène est très général et tous les métaux, placés dans des conditions convenables, sont susceptibles d'être passifs. Le fer, en particulier lorsqu'il est allié au chrome en proportion convenable, est passif dans un grand nombre de milieux. Cette propriété est la base de la résistance des aciers inoxydables à la corrosion et le facteur déterminant de cette propriété réside dans la stabilité de la couche passive.

Cette couche passive se forme spontanément par simple exposition de ce métal à l'air humide atmosphérique (autopassivation). On provoque également une passivation extrêmement solide par traitements chimiques ou électrochimiques de la surface.

Le mécanisme de la corrosion et les solutions qu'apportent les aciers inoxydables seront précisés en deuxième partie (page 44).

Compte tenu de ces observations, on convient d'appeler acier inoxydable un alliage fer-chrome où la teneur en chrome est supérieure à 11,5 % et qui présente une bonne résistance aux atmosphères oxydantes et à la corrosion par certains milieux jusqu'à des températures moyennement élevées. Cette définition commode, basée sur la composition du métal, est exacte si le chrome est, dans l'alliage, le seul élément passivant du fer. Les aciers inoxydables peuvent contenir d'autres éléments d'addition tels que nickel, molybdène, carbone, azote, silicium, manganèse, cuivre, titane, niobium, tungstène, vanadium, cobalt, soufre, etc., dont la présence peut être spécifique des conditions de mise en œuvre et d'utilisation.

L'addition de nickel donne une résistance accrue dans les milieux faiblement oxydants ou non oxydants. Mais l'effet de cet élément n'est pas seulement d'augmenter la résistance à la corrosion; au-delà d'un certain pourcentage, fonction de la quantité de chrome, l'addition de nickel confère à l'acier une structure cristalline cubique à faces centrées, dite austénitique, généralement non magnétique, qui permet d'obtenir de meilleures caractéristiques de ductilité, de résistance mécanique à chaud et de soudabilité.

Les grandes classes d'aciers inoxydables dont la structure est austénitique sont les suivantes :

- aciers à 17 % de chrome et 7 % de nickel,
- aciers à 18 % de chrome et 10 % de nickel,
- aciers à 25 % de chrome et 20 % de nickel,
- aciers à 18 % de chrome et 38 % de nickel.

Le molybdène agit sur la passivité et sur la résistance chimique des aciers inoxydables dans les acides réducteurs ou en présence d'ions chlore.

Le titane et le niobium, surtout utilisés dans les aciers inoxydables austénitiques à teneur en carbone supérieure à 0,03 %, jouent un rôle très

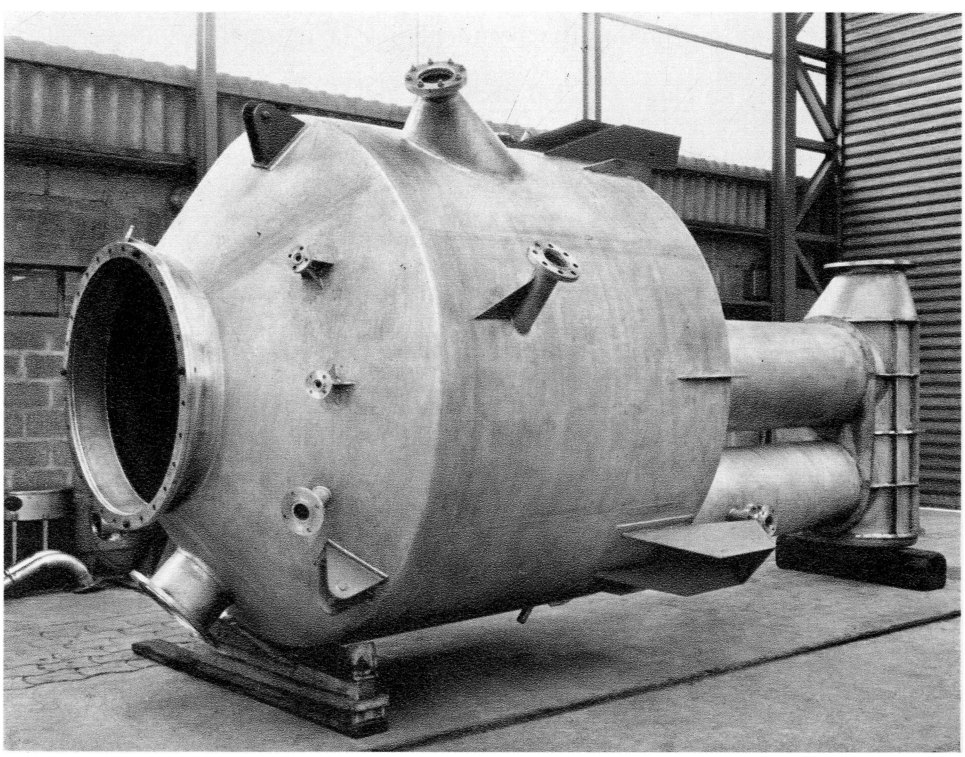
particulier. Ils fixent le carbone sous forme de carbures stables et évitent ainsi la corrosion intercristalline dans certains milieux. Pour éviter ce phénomène, une autre solution également bien connue consiste à utiliser des aciers inoxydables austénitiques à très basse teneur en carbone (inférieure à 0,03 %).

Tout comme le chrome, le silicium et l'aluminium augmentent la résistance à l'oxydation à haute température.

Les éléments molybdène, titane, niobium, vanadium, tungstène sont souvent utilisés pour accroître la résistance mécanique à chaud.

Enfin, l'addition de soufre améliore très sensiblement l'usinabilité des aciers inoxydables.

Il faut aussi signaler les alliages à base de nickel et quelquefois de cobalt, contenant de fortes proportions de chrome, molybdène et tungstène, dont l'apparition relativement récente a permis de résoudre des problèmes de corrosion et de résistance à température élevée pour lesquels les aciers inoxydables et résistant à chaud classiques s'étaient révélés insuffisants.



SATURATEUR DE NITRATE D'AMMONIAQUE
ACIER 18-12 Mo (NSM 21 S)

Chapitre II

LES DIFFÉRENTS TYPES D'ACIERS INOXYDABLES

On peut classer les aciers inoxydables, soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur structure cristalline.

D'après leur composition chimique, les aciers inoxydables se classent essentiellement en deux groupes :

• **les aciers au chrome,** dont la teneur en chrome est comprise entre 11,5 % et 30 %. Lorsqu'on laisse refroidir ces aciers à l'air depuis 900-1100°, ils se répartissent en trois catégories. Les uns prennent la trempe et se comportent comme des aciers spéciaux autotrempants; d'autres prennent une trempe partielle et durcissent légèrement; d'autres, enfin, ne subissent pas de transformation à chaud et ne prennent pas la trempe.

• **les aciers au chrome-nickel** dont la teneur en chrome ne dépasse pas 25 % et qui contiennent plus de 6 % de nickel. Ces aciers sont utilisés après un refroidissement rapide appelé hypertrempe à partir d'une température élevée. Ce traitement leur confère une structure à laquelle sont liées leurs propriétés optimales de ductilité, de ténacité et de résistance à la corrosion.

D'après la structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé, les aciers inoxydables se classent en trois grandes catégories :

- les aciers martensitiques dont la structure cristalline est quadratique.
- les aciers ferritiques dont la structure cristalline est cubique centrée.
- les aciers austénitiques dont la structure cristalline est cubique à faces centrées.

Cette classification correspond mieux que la précédente aux propriétés physiques et mécaniques de ces alliages.

On classe parallèlement les éléments d'addition des aciers en éléments qui favorisent la structure ferritique, éléments « alphagènes », par exemple : chrome, vanadium, tungstène, molybdène, titane, niobium, silicium et en éléments qui favorisent la structure austénitique, éléments « gammagènes », par exemple : cobalt, nickel, manganèse.

• **Les aciers martensitiques.** — Ces aciers sont autotrempants et sont susceptibles de donner des caractéristiques mécaniques variées suivant la teneur en carbone et le traitement thermique (recuit, trempe et revenu); les plus courants titrent 13 % de chrome avec des teneurs en carbone supérieures à 0,08 %.

Ce sont les nuances UGINE : FI - U 12 - P 12 et F 12 S, cette dernière pour usinabilité améliorée.

• **Les aciers ferritiques.** — Ces aciers ne prennent pas la trempe et, dans cette catégorie, on rencontre d'abord le plus couramment les aciers ayant pour composition en % :

C 0,07 Cr 17 (nuance UGINE F 17)
C 0,07 Cr 17 avec Mo (nuance UGINE F 17 M)

qui ont en réalité une structure mixte, ferritique-austénitique à chaud, et ne sont purement ferritiques qu'après recuit au-dessous de 850-900 °C; ils ne durcissent que faiblement par trempe. Ils sont par ailleurs moins sensibles que les aciers purement ferritiques au grossissement du grain, en raison de leur structure mixte à chaud, possèdent une bonne ductilité et occupent, du point de vue de la résistance à la corrosion, une position intermédiaire entre les aciers martensitiques et les aciers austénitiques.

Ensuite existent des aciers ferritiques avec des teneurs en chrome plus faibles, mais avec des teneurs en carbone suffisamment basses ou de faibles teneurs d'additions spéciales; exemple :

Cr 12 C 0,03 (nuance UGINE FIA)

Les qualités à teneur élevée en chrome présentent une résistance remarquable à l'oxydation aux hautes températures, plus particulièrement dans les atmosphères sulfureuses; leur emploi est d'ailleurs spécialement recommandé à chaud, car elles présentent à froid une certaine fragilité provenant d'une tendance au grossissement du grain que l'on ne peut régénérer par un simple traitement thermique.

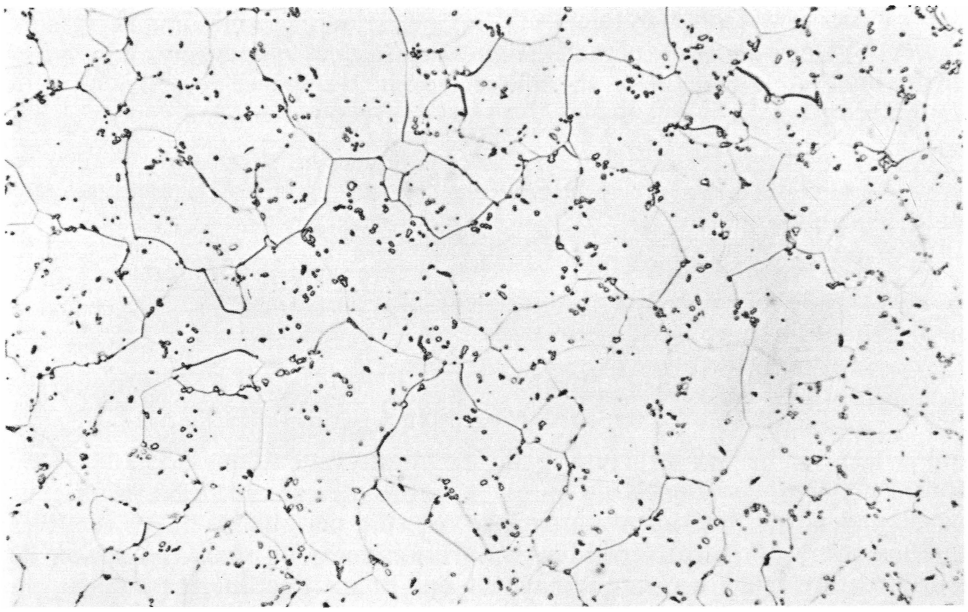
Citons, pour sa résistance aux températures élevées, l'acier à haute teneur en chrome : Cr 25 C 0,12 (nuance UGINE DY1)

• **Les aciers austénitiques.** — Ces aciers contiennent généralement plus de 16 % de chrome, mais leur composition moyenne de base est : 18 % Cr et 9 % Ni; leurs propriétés varient avec la teneur de ces deux éléments et aussi avec la teneur en carbone.

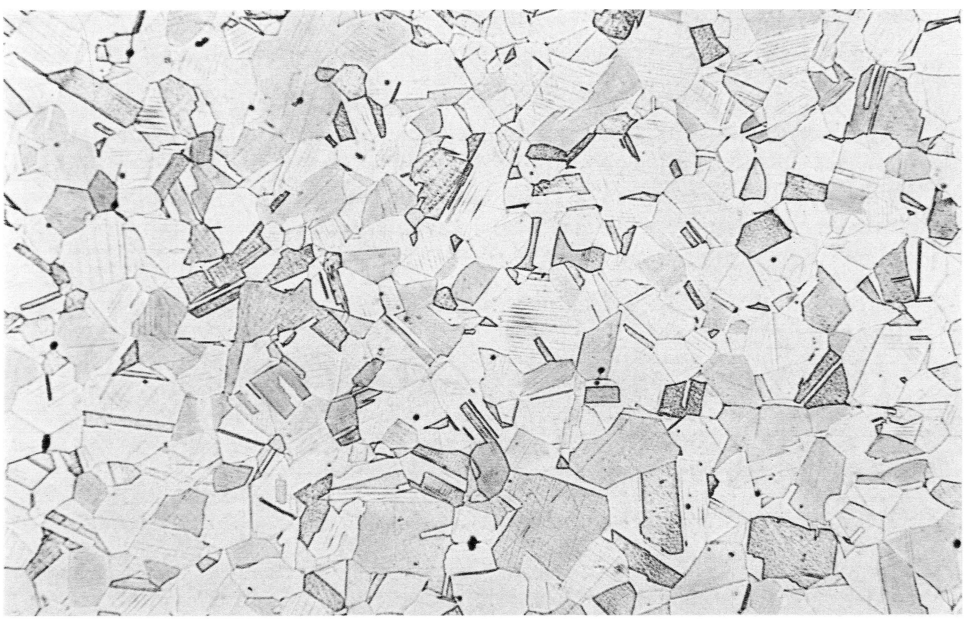
Les aciers austénitiques sont livrés dans un état leur donnant une résistance maximale à la corrosion.

Parmi les compositions diverses on peut citer les plus courantes :

— les aciers 18-10 à teneur moyenne en carbone non stabilisés (nuances UGINE : NS 20 - NS 20 E - NS 20 P - NS 21 P - [redacted] - NSU);



STRUCTURE FERRITIQUE - COUPE D'UNE BARRE EN ACIER A 17 % DE Cr
(GROSSISSEMENT 500)



STRUCTURE AUSTÉNITIQUE - COUPE D'UNE BARRE EN ACIER 18 % Cr, 12 % Ni AVEC Mo
(GROSSISSEMENT 100)

— les aciers 18-10 à basse teneur en carbone (nuances UGINE : NS 21 A - NS 21 AS - NSM 21);
— les aciers 18-10 à très basse teneur en carbone, moins de 0,03 % (nuances UGINE : NS 22 S - NSM 21 S - NSM 22 S - NSCD);
— les aciers stabilisés au titane (nuances UGINE : NS 21 S - NS 21 C - NSMC - NS 190) ou au niobium (NS 95);
— les aciers plus chargés en chrome et en nickel (nuances UGINE : NSZ - NS 24 - NS 30 - FLUGIVAC 130 - QA 2).

Il faut signaler l'intérêt dans certaines applications des aciers à durcissement structural, en particulier la nuance FLUGIVAC 130, dont l'austénite est susceptible de vieillissement. Le terme de **FLUGIVAC** est employé lorsque la nuance est élaborée sous vide.

L'emploi des aciers non stabilisés, en général moins coûteux, se justifie parfaitement lorsque l'une des conditions suivantes est réalisée :
— pas de chauffage dans la fourchette 500 °C - 800 °C,
— pas de soudage à l'argon ou avec électrodes enrobées, ni de soudage sous flux solide (le soudage par points et le soudage à la molette sont autorisés),
— possibilité d'hypertrempe après soudage conventionnel,
— milieu ambiant ne provoquant pas de corrosion intercristalline.

Aciers et alliages pour utilisation aux températures élevées

Aux hautes températures le comportement mécanique des métaux et des alliages est sensiblement différent de leur comportement à la température ambiante, car, sous contrainte permanente, il se superpose à la déformation élastique réversible une déformation lente et irréversible, de nature visqueuse, appelée **fluage;** cet allongement non élastique qui croît avec le temps est négligeable jusqu'à 450°C.

Aussi, lorsqu'ils travaillent aux températures élevées, les aciers doivent avoir une composition différente des aciers inoxydables courants et dans la pratique ils présentent alors le plus souvent aux sollicitations mécaniques et chimiques des caractères de résistance inégalement marqués suivant leur composition. Certains d'entre eux, dans des domaines de températures bien déterminés, ont une résistance chimique particulièrement élevée, d'autres une résistance mécanique plus favorable.

Ceci a donc amené à faire une séparation en deux groupes, qui n'est pas rigoureuse, mais qui tient compte des conditions pratiques d'emploi. Pour l'un la résistance à la corrosion à chaud des aciers, qui est le facteur principal, est associé aux caractères spécifiques qu'apportent le chrome et le nickel en teneur relativement importante (aciers couramment appelés réfractaires); pour l'autre, la résistance au fluage, qui est déterminante, est conférée par des additions durcissantes de tungstène et de molybdène d'une part, de titane, de niobium, de vanadium ou d'aluminium d'autre part.

Chapitre III

LES ACIERS INOXYDABLES UTILISÉS A LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

Sur le tableau ci-après, seules figurent les nuances UGINE pouvant être employées dans la réalisation d'appareils chaudronnés utilisés à la température ambiante.

Le tableau complet des nuances couramment employées dans l'industrie ainsi que les notices établies pour chacune d'entre elles peuvent être obtenus sur demande au Service Documentation de la Division "Aciers Spéciaux" d'UGINE KUHLMANN, 10, rue du Général-Foy, à PARIS-8e.

Ces tableaux donnent, en particulier, les caractéristiques mécaniques des aciers dont nous rappelons maintenant les définitions :

1 - R est la charge de rupture conventionnelle à la traction qui donne la charge maximum que peut supporter l'éprouvette-type de métal, charge rapportée à la section initiale en mm² de l'éprouvette.

Cette charge est très inférieure à la charge de rupture rationnelle qui est la charge que supporte l'éprouvette, rapportée à la section réelle de rupture.

2 - E est la limite d'élasticité, c'est-à-dire en première analyse la charge maximum qui provoque la déformation permanente de l'éprouvette; elle donne la limite apparente d'élasticité au-delà de laquelle se manifestent des déformations permanentes telles que l'éprouvette de traction ne retrouve plus sa longueur primitive lorsqu'on supprime l'effort.

E est le chiffre obtenu divisé par la section primitive en mm².

Dans le cas des aciers inoxydables austénitiques, la transition entre le domaine élastique et le domaine plastique est très progressive. Aussi, l'usage est de définir pour ces aciers une limite conventionnelle qui est l'effort unitaire tel qu'après suppression de l'effort le métal garde un allongement permanent donné, généralement fixé à 0,2 %. Cette limite conventionnelle à 0,2 % d'allongement rémanent est notée $E_{0,2}$.

3 - A % est l'allongement de l'éprouvette après rupture. Cet allongement total est la somme de l'allongement uniformément réparti le long de l'éprouvette et de l'allongement localisé dans la zone de striction. (Rappelons que la striction Σ mesure dans la partie rompue la réduction de la section de l'éprouvette rapportée à la section initiale).

Il en résulte que la mesure donne un résultat d'autant plus élevé que la distance initiale entre repères est plus courte, pour une éprouvette donnée. Il faut donc préciser quelle est cette longueur initiale chaque fois qu'on donne un allongement de rupture. Les allongements donnés dans les notices relatives aux différents aciers sont mesurés sur une distance entre repères égale à $5{,}65\sqrt{so}$ (so = section initiale de l'éprouvette).

4 - KUF signifie que la résilience K a été mesurée avec des éprouvettes du type UF; le chiffre de résilience (essai de rupture en un seul coup d'un barreau entaillé en son milieu) est le quotient du travail de rupture, dû à un coup de masse au dos de l'entaille, par la section du barreau à l'endroit de l'entaille; une bonne résilience caractérise un métal peu fragile.

Les tableaux indiquent, lorsqu'ils sont nécessaires, les traitements thermiques types à appliquer dans la colonne « États de référence » avec les mentions : TE (trempe à l'eau), TA (trempe à l'air), TH (trempe à l'huile), R (revenu).

UNITÉS

D'une façon générale, les valeurs de R, E, $E_{0,2}$ données dans les notices sont exprimées en kgf/mm² (kilogramme-force par mm²), bien que l'unité légale actuelle soit le pascal. On lui substitue en fait l'hectobar, d'emploi plus commode. La correspondance est la suivante :

— 1 kgf/mm² = 0,98 hectobar

— 1 hectobar = 1,02 kgf/mm²

Il en est de même des valeurs de résilience, qui sont données en kilogrammètre par cm² (kgf.m/cm²). L'unité légale est le joule par mètre carré, d'emploi peu commode; on lui substitue le décajoule par centimètre carré, tel que:

— 1 kgf.m = 0,98 daJ.

La septième partie donne la liste des unités de mesure du système international, leur définition et, lorsqu'elles sont nouvelles, leur rapport avec les anciennes unités.

CHOIX DE L'ACIER

D'une façon générale le choix d'une nuance dépend d'exigences mécaniques et d'exigences chimiques; les indications de caractéristiques mécaniques portées sur les tableaux et les précisions données dans les chapitres suivants sur les propriétés physiques et la résistance à la corrosion des aciers inoxydables permettent de l'orienter.

Pratiquement, il est toujours recommandé de nous consulter en donnant le maximum de renseignements sur les conditions de l'utilisation prévue des aciers, spécialement sur la nature et le fonctionnement de l'appareil envisagé et sur le milieu, éventuellement corrosif.

	MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES					SOUDURE (métal d'apport)
				États de référence	R kgf/mm²	E kgf/mm² mini	A% mini	KUF kgm/cm² mini	
	ACIERS MARTENSITIQUES AU CHROME								
★	**FI**	C : 0,10 Cr : 13	Z 12 C 13 AISI 410	TH 950°C + R 650°C	65/80	45	15	8	FI UGINARC 23 S
	U 12	C : 0,20 Cr : 13	Z 20 C 13 AISI 420	TH 950°C + R 650°C	80/95	60	13	4	UGINARC 23 S
★	**P 12**	C : 0,30 Cr : 13	Z 30 C 13 AISI 420	TH 950°C + R 650°C	85/100	70	10		UGINARC 23 S
	ACIERS DE DÉCOLLETAGE								
★	**F 12 S**	C : 0,07 Cr : 13 S : 0,25	Z 12 CF 13 AISI 416 BS En 56 AM	État de livraison	90				
★	**F 17 S**	C : 0,10 Cr : 17 S : 0,20	Z 10 CF 17 AISI 430 F type Wr n° 4104	État de livraison	75/90				
★	**NSU**	C : 0,06 Cr : 18 Ni : 8,5 S : 0,25	Z 10 CNF 18-09 AISI 303 BS En 58 M type Wr n° 4305	Barres adoucies Barres écrouies	55/70 80	20	40		UGINARC MK2

Le soudage des aciers au chrome est déconseillé

★ Ces nuances sont, dans les dimensions courantes, en stock dans nos magasins.

REMARQUES: 1° - **AISI** = normes américaines - **BS** = normes anglaises - **Wr** = codification allemande WERKSTOFF.
Les nouvelles normes anglaises et allemandes, en vigueur depuis 1968, sont indiquées page 215 (tableau A 4) en correspondance avec les normes françaises figurant sur les tableaux de ce chapitre.
2° - Nous fabriquons également les nuances de ces tableaux refondues sous vide au four à électrode consommable : **Série UGIVAC.**

MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES				SOUDURE (métal d'apport)
			États de référence	R kgf/mm²	E kgf/mm² mini	A % mini	

ACIERS FERRITIQUES AU CHROME

★	**F 17**	C : 0,07 Cr : 17	Z 8 C 17 AISI 430 BS En 60 Wr n° 4016	Barres adoucies Tôles adoucies	45/60 47/62	30 30	18 25	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
	F 17 M	C : 0,07 Cr : 17 Mo : 1	Z 6 CD 17 AISI 434 Wr n° 4113	Barres adoucies Tôles adoucies	45/65 50/65	30 32	20 22	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1

ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME-NICKEL

★	**NS 20**	C : 0,10 Cr : 17 Ni : 7,5	Z 12 CN 17-08 AISI 301 Wr n° 4310	Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	70/90 70/90	25 27	45 45	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
	NS 20 E	C : 0,10 Cr : 18 Ni : 7,5	type Z 10 CN 18-09 AISI 301 type Wr n° 4310	Normalement livré en tôles à l'état écroui	Consulter notice			UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
★	**NS 20 P**	C : ⩽ 0,09 Cr : 18 Ni : 8,5	Z 10 CN 18-09 AISI 302 Wr n° 4300	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	55/70 55/70 55/70	21 23 24	45 50 50	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
	NS 21 P	C : 0,10 Cr : 18 Ni : 8,5	Z 10 CN 18-09 AISI 302 Wr n° 4300	Barres adoucies	55/70	21	45	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
★	**NS 21 A**	C : ⩽ 0,07 Cr : 18 Ni: 8,5 C : ⩽ 0,07 Cr : 18 Ni: 9	Z 6 CN 18-09 type AISI 304 Wr n° 4301	Barres adoucies Tôles à froid mates glacées ou à chaud	52/67 55/70 55/70	19 21 23	50 50 50	UGINARC 23 S
★	**NS 21 AS**	C : ⩽ 0,08 Cr : 19 Ni: 8,5 C : ⩽ 0,07 Cr : 18,5 Ni: 9,5	Z 6 CN 18-09 AISI 304 Wr n° 4301	Barres adoucies Tôles à froid mates glacées ou à chaud	52/67 55/70 55/70	19 21 23	50 50 50	UGINARC 23 S1
	NS 22 I	C : ⩽ 0,025 Cr : 19 Ni : 11	Z 2 CN 18-10 AISI 304 L Wr n° 4306	Barres adoucies	45/60	16	50	UGINARC 23 L

	MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES				SOUDURE (métal d'apport)
				États de référence	R kgf/mm²	E kgf/mm² mini	A% mini	
★	**NS 22 S**	C : ⩽ 0,03 Cr : 18 Ni : 9	Z 2 CN 18-10 type AISI 304 L type Wr n° 4306	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	50/65 50/65 50/65	17 19 22	50 50 50	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
	NS 21 S	C : 0,10 Cr : 18 Ni : 10,5 Ti/C : ⩾ 4	type Z 10 CNT 18-11 type AISI 321 type Wr n° 4541	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à chaud	52/67 55/70 55/70	20 23 25	45 45 45	UGINARC 23 S UGINARC 23 S1
★	**NS 21 C**	C : ⩽ 0,08 Cr : 18 Ni : 10,5 Ti/C : ⩾ 5	Z 6 CNT 18-11 AISI 321 Wr n° 4541	Tôles à froid mates glacées ou à chaud	55/70	25	45	FLUGINARC 20
	NS 95	C : 0,06 Cr : 18 Ni : 12 Nb/C : ⩾ 10	Z 6 CNNb 18-12 AISI 347	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	52/67 55/70 55/70	20 23 25	35 35 35	UGINARC 23 X UGINARC 23 S1 UGINARC 23 S

ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME-NICKEL-MOLYBDÈNE

	NSM 21	C : ⩽ 0,08 Ni : 11 Cr : 17 Mo ⩾ 2 C : ⩽ 0,07 Ni : 11,5 Cr : 17 Mo : ⩾ 2	Z 6 CND 17-11 AISI 316 Wr n° 4401	Barres adoucies Tôles à froid mates glacées ou à chaud	50/65 52/67	20 25	50 45	UGINARC MKS UGINARC MKS1
★	**NSM 21 S**	C : ⩽ 0,03 Cr : 17 Ni : 11 Mo : ⩾ 2	type Z 2 CND 17-12 AISI 316 L type Wr n° 4404	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	50/65 50/65 50/65	19 22 24	50 45 45	UGINARC MKS UGINARC MKS1
★	**NSM 22 S**	C : ⩽ 0,03 Cr : 17,5 Ni : 12 Mo : ⩾ 2,5	type Z 2 CND 17-13 AISI 316 L type Wr n° 4435	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	50/65 50/65 50/65	19 22 24	50 45 45	UGINARC MKS UGINARC MKS1
★	**NSMC**	C : 0,08 Cr : 17 Ni : 11,5 Mo : ⩾ 2 Ti/C : ⩾ 4	Z 8 CNDT 17-12 type Wr n° 4571	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	52/67 55/70 55/70	20 23 25	45 45 45	UGINARC MKS UGINARC MKS1
★	**NSCD**	C : ⩽ 0,03 Cr : 17,5 Ni : 16 Mo : ⩾ 5 Cu : 3	Z 2 CNDU 17-16	Barres adoucies Tôles à froid mates Tôles à froid glacées ou à chaud	55/70 60/75 60/75	23 26 28	35 35 35	NSCD

MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES				SOUDURE (métal d'apport)
			États de référence	R kgf/mm²	E kgf/mm² mini	A% mini	

ALLIAGES A BASE NICKEL

UC 76 C	C : ⩽ 0,04 Cr : 16 Mo : 16 Fe : 5 W : 4 Ni : solde	ASTM B 334 ASTM B 336	Barres adoucies Tôles	70/90 70/90	32 32	25 35	UC 76 C FLUGINARC N65
UC 87 B	C : ⩽ 0,05 Mo : 28 Fe : 5 Ni : solde	ASTM B 333 ASTM B 335	Barres adoucies Tôles	70/90 80/100	32 32	30 35	UC 87 B FLUGINARC N65
UC 72 R	Ni : 66 Cu : 33	NU 30 ASTM B 164	Brut de forge Barres adoucies	50/65 45/60	22 18	30 30	UGINARC N 72

ACIERS A DURCISSEMENT STRUCTURAL

FLUGIVAC 130	C : 0,05 Cr : 15 Ni : 25 + Mo + V + Ti		TA 900 °C + R 725 °C - 16 h	⩾ 95	60	20	FLUGINARC 130 FLUGINARC N 65
NSPF 3	C : 0,04 Cr : 15 Ni : 4,5 Mo : 1,5 Cu : 3,5		Trempe 1.050 °C + Revenu entre 450 et 625 °C	85/145	70/130	25/8	NSPF 3 A

RAPPEL : ★ Les nuances F 17 - NS 20 - NS 20 P - NS 21 A - NS 21 AS présentées page 25, ainsi que les nuances NS 22 S - NS 21 C - NSM 21 S - NSM 22 S - NSMC - NSCD et NSPF 3 présentées pages 26 et 27 sont, dans les dimensions courantes, en stock dans nos magasins.

REMARQUES : 1° - **AISI** = normes américaines - **BS** = normes anglaises - **Wr** = codification allemande WERKSTOFF. Les nouvelles normes anglaises et allemandes, en vigueur depuis 1968, sont indiquées page 215 (tableau A4) en correspondance avec les normes françaises figurant sur les tableaux de ce chapitre.

2° - Nous fabriquons également les nuances de ces tableaux refondues sous vide au four à électrode consommable : **Série UGIVAC.**

Chapitre IV

LES ACIERS ET ALLIAGES INOXYDABLES UTILISÉS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Les aciers et alliages pour emploi aux températures élevées indiquées dans le tableau ci-après et dont certains figurent déjà dans le tableau des aciers inoxydables courants (emploi mixte) sont ceux les plus couramment utilisés en chaudronnerie. Leur composition a été établie non seulement après des essais de laboratoire, mais après des expériences industrielles.

Pour augmenter les performances des installations et machines fonctionnant à hautes températures, on a demandé aux aciers et alliages entrant dans leur construction de satisfaire à un nombre croissant d'exigences. Or, dans le choix d'un matériau devant travailler aux températures élevées, il faut tenir compte des résultats de certains essais conventionnels d'une importance primordiale pour déterminer l'emploi.

Il s'agit des propriétés suivantes :

— Charge de rupture et limite conventionnelle à 0,2 %, dans un essai de traction rapide classique, aux températures d'emploi.

— Caractéristiques de fluage-rupture et de fluage-allongement, donnant la contrainte qui provoque respectivement, à la température d'emploi, la rupture ou un allongement plastique donné, au bout du temps de service recherché pour l'installation. Sur les tableaux, σ_R est la contrainte provoquant la rupture en 10.000 heures, soit à la température maximale d'emploi, soit à la température inférieure indiquée.

— Fragilisation de l'acier au cours d'un service de longue durée à chaud, que l'on caractérise par deux propriétés :

  • ductilité à chaud représentée généralement par la striction et l'allongement des éprouvettes de fluage à la rupture, mesurés aux températures d'emploi,

  • ductilité à l'ambiante après service à haute température, représentée par l'allongement en traction ou la résilience après maintien de longue durée à chaud, avec ou sous contrainte appliquée.

La résistance à la corrosion à chaud et la soudabilité, dont il faut toujours tenir compte, sont par contre beaucoup plus difficiles à caractériser par des essais de laboratoire directement applicables à l'utilisation pratique.

Suivant l'emploi particulier, certaines de ces propriétés seront essentielles, les autres restant accessoires. Toutefois, étant donné que les conditions de service imposées aux matériaux travaillant à haute température sont généralement complexes, et que l'on doit fréquemment associer, dans une même

construction, des aciers et alliages de catégories diverses, la première sélection d'un matériau, pour une application donnée, résulte toujours d'un compromis technique entre les diverses propriétés qu'on lui demande.

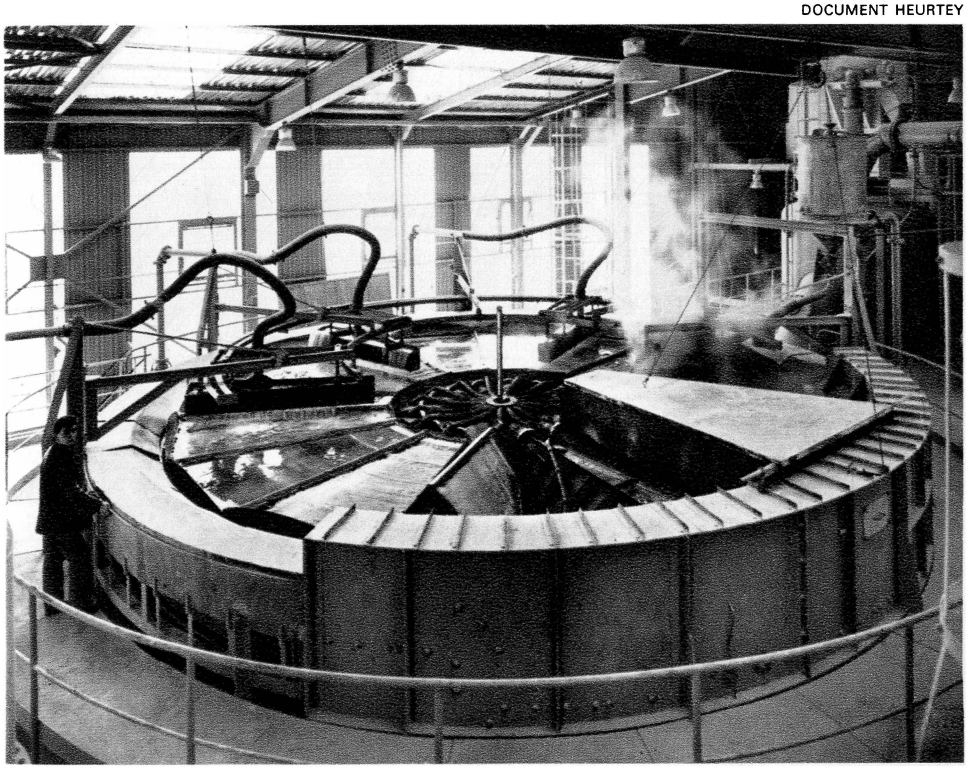
Dans la pratique, des considérations supplémentaires entrent en jeu pour définir l'aptitude du matériau à une application donnée :

— d'une part, le constructeur recherche une sécurité de fonctionnement et pour cela doit tenir compte, à côté des caractéristiques classiques, des sollicitations exceptionnelles ou des éléments inaccessibles au calcul,

— d'autre part, une élaboration ou une présentation particulière de l'acier par le fournisseur (par exemple : aciers refondus sous vide, pièces forgées ou pièces moulées de précision) peuvent permettre de l'utiliser avec des frais de mise en œuvre moins élevés.

Le choix final pour un emploi à température élevée résulte donc d'un compromis économique, dans lequel le coût des opérations de fabrication ou de mise en œuvre peut importer davantage que le prix du matériau.

DOCUMENT HEURTEY



FILTRE A GODETS BASCULANTS
POUR LA SÉPARATION DU GYPSE ET DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE
ACIER 18-12 Mo (NSM 23)

MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES					UTILISATION		SOUDURE (métal d'apport)
			États de référence	R kgf/mm² moyennes	E kgf/mm² moyennes	A% moyennes	Fluage σ_R 10^4 h kgf/mm²	T maximale	Emplois	
ACIERS FERRITIQUES ET MARTENSITIQUES										
C **FIA**	C : 0,03 Cr : 12	Z 06 C 13	TA 950° + R 680°	63	45	20	à 500° 15	650°	Installations pétrolières et thermiques	FIA UGINARC MKS UGINARC 23 S UGINARC R 31
F **FLUGINOX 65**	C : 0,22 Cr : 11,5 Mo : 1,0 V : 0,3 Nb : 0,3	Z 20 CDV Nb 11	TH 1125° + R 700°	100	85	15	à 600° 15 à 550° 30	625°	Boulonnerie	FLUGINOX 65
★ C **F 17**	C : 0,07 Cr : 17	Z 08 C 17 AISI 430	Recuit 820°	50	30	30	à 600° 4,5 à 500° 17	850°	Pièces de fours	UGINARC 23 S
ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME-NICKEL *résistant au fluage*										
★ F **NS 21 C**	C: ⩽ 0,08 Cr: 18 Ni : 10,5 Ti : ⩾ 5C	Z 06 CNT 18-11 AISI 321	TE/TA 1.100°	60	25	50	à 650° 13,5 à 600° 21	700°	Chaudières	FLUGINARC 20
F **NS 95**	C : 0,06 Cr : 18 Ni : 12 Nb : ⩾ 10C	Z 06 CNNb 18-11 AISI 347	TE/TA 1.100°	60	25	40	à 650° 16,5 à 600° 23	700°	Installations nucléaires	FLUGINARC 20 UGINARC 23 X
★ F **NSMC**	C : 0,08 Cr : 17 Ni: 11,5 Mo: ⩾ 2 Ti : ⩾ 4C	Z 08 CNDT 17-12 AISI 316 Ti	TE/TA 1.100°	60	25	50	à 650° 15 à 600° 25	700°	Constructions forgées ou chaudronnées	FLUGINARC 20 UGINARC MKS

F = Résistant au fluage
C = Résistant à la corrosion à chaud

★ Ces nuances sont, dans les dimensions courantes, en stock dans nos magasins.

REMARQUE : Nous fabriquons également les nuances de ces tableaux refondues sous vide au four à électrode consommable : **Série UGIVAC.**

MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES					UTILISATION		SOUDURE (métal d'apport)
			États de référence	R kgf/mm² moyennes	E kgf/mm² moyennes	A % moyennes	Fluage σ_R 10^4 h kgf/mm²	T maximale	Emplois	

ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME-NICKEL

résistant au fluage

F **NS 190 adouci**	C : 0,10 Cr : 17 Ni : 13,5 W : 3,5 Ti : ⩾ 5C	Z 10 CNWT 17-13	TE/TA 1.100°	60	25	40	à 700° 10,5 à 650° 14	750°	Pièces fines et mobiles de turbines	FLUGINARC 20
F **NS 190 écroui**			Écroui à chaud	70	55	30	à 750° 8 à 700° 14	750°		
F **FLUGIVAC 130**	C:0,05 Ni:25 Cr:15 Ti:1,8 Mo+V+Al	Z 05 NCTDV 25-15	TA 980° 30 mn + R 725° 16 h	95	65	25	à 650° 24	700°	Ensembles chaudronnés de turbines à gaz	FLUGIVAC 130 FLUGINARC N 65
F **FLUGIVAC 131**	C:0,05 Ni:25 Cr:15 Ti:2,1 Mo+V+Al	Z 06 NCTDV 25-15 AISI 660	TH 980° 1 h + R 725 16 h	100	70	25	à 650° 24	700°	Pièces forgées Boulonnerie	

ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME-NICKEL

résistant à la corrosion à chaud

★	C **NSZ**	C:0,15 Cr:20 Ni : 11 Si : 2	Z15 CNS 20-11 AISI 302B	TE/TA 1.125°	65	30	35	à 900° 0,6 à 800° 1,7	950°	Fours industriels de traitement thermique	FLUGINARC R 27 UGINARC R 31
★	C **NS 24**	C:0,15 Cr:23 Ni : 13,5 Si : ⩽ 1	Z15 CN 23-13 AISI 309	TE/TA 1.125°	65	30	35	à 900° 0,7 à 800° 1,8	1.000°		UGINARC R 27
★	C **NS 30**	C:0,10 Cr:25 Ni : 20 Si : ⩽ 1	Z12 CNS 25-20 AISI 310	TE/TA 1.125°	65	30	35	à 900° 0,8 à 800° 2,3	1.050°		UGINARC R 31
★	C **QA 2**	C:0,2 Cr:18 Ni : 38 Si : 2	Z12 NCS 37-18 AISI 330	TE/TA 1.125°	65	35	35	à 900° 1,0 à 800° 2,6	1.100°		FLUGINARC N 65

Les tôles dans ces quatre nuances sont livrées à l'état adouci.

MARQUE UGINE	ANALYSE MOYENNE %	NORMES	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES					UTILISATION		SOUDURE (métal d'apport)
			États de référence	R kgf/mm² moyennes	E kgf/mm² moyennes	A % moyennes	Fluage σ_R 10^4 h kgf/mm²	T maximale	Emplois	

ACIERS AUSTÉNITIQUES AU CHROME NICKEL-COBALT

résistant au fluage et à la corrosion à chaud

FLUGINOX 150	C:0,12 Cr:20 Ni:20 Co:20 Mo:3 W:2,5 Nb:1	Z12 CNKDW 20 AISI 661	TE/TA 1.150°	75	35	40	à 700° 4 à 750° 10,5	1.000°	Chaudronnerie Pièces forgées	FLUGINOX 150

ALLIAGES AUSTÉNITIQUES BASE NICKEL

résistant au fluage et à la corrosion à chaud

QA 18	C:0,10 Cr:20 Ti : 0,4 Ni solde.	NC 20 T	TE/TA 950°	75	35	35	à 900° 1,7 à 800° 2,5	1.200°	Pièces chaudronnées et ensembles de turbines à gaz résistant à l'oxydation et aux chocs thermiques	FLUGINARC N 65
QA 7	C:0,05 Cr:16 Fe : 7 Ni solde.	NC 15 Fe	TE/TA 1.025°	65	30	40	à 900° 1,5 à 800° 2,8	1.150°		FLUGINARC N 65
FLUGINOX N 25	C : 0,06 Cr : 21,5 Fe : 18 Mo : 9 + Co, W, Ni solde.	NC 22 FeD AISI 680	TE 1.175°	80	35	35	à 900° 2,5 à 800° 5,5			FLUGINOX N 25 FLUGINARC N 65

ALLIAGE AUSTÉNITIQUE BASE COBALT

résistant au fluage et à la corrosion à chaud

FLUGIVAC C 35	C:0,10 Cr:20 W:15 Ni:10 Co solde.	KC 20 WN AISI 670	TE 1.210°	100	40	35	à 900° 3,5 à 800° 9,0	1.150°	Pièces chaudronnées	FLUGINOX C 35

Chapitre V

UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES AUX BASSES TEMPÉRATURES

Les techniques de production du froid sont utilisées pour la conservation des denrées alimentaires, la climatisation des locaux, en médecine et en chirurgie, en électronique et en électrotechnique, dans la chimie (en particulier en pétrochimie), en métallurgie, dans les industries aérospatiales et nucléaires, etc. et le domaine cryogénique s'étend actuellement de la température ambiante au voisinage immédiat du zéro absolu.

Les industries dites « cryogéniques », promises à une certaine croissance, sont :

— l'industrie des gaz liquéfiés (azote, oxygène, hydrogène, etc.), qu'il s'agisse de leur production, de leur stockage, de leur transport ou de leur manutention et de leur utilisation.

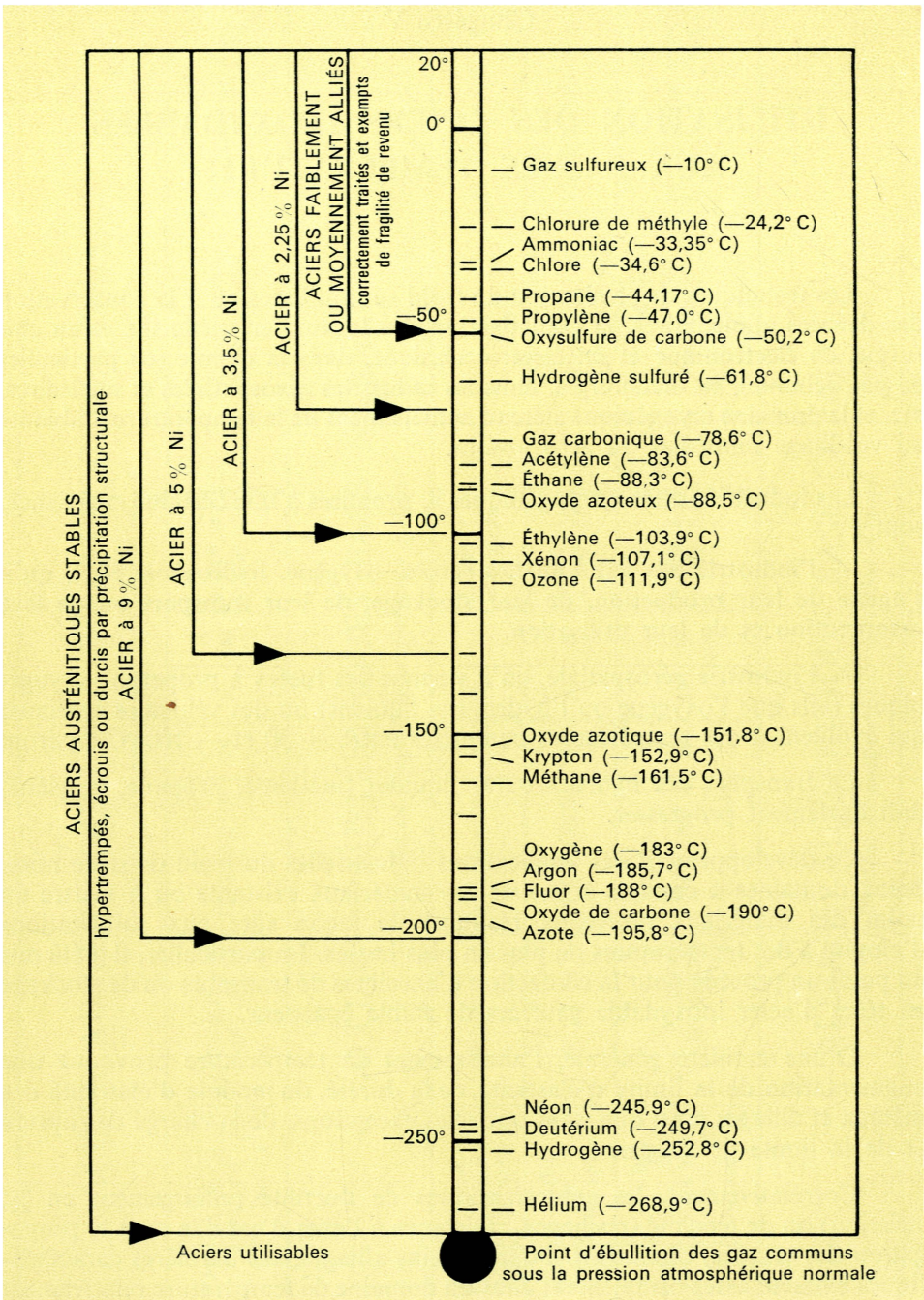
— l'industrie aérospatiale, qu'il s'agisse des fusées à propergols cryogéniques (tels que l'oxygène ou l'hydrogène liquides) ou des véhicules spatiaux, qui évoluent à des températures comprises entre — 50 et — 100 °C environ.

Le transport des hydrocarbures liquides (méthane, propane, éthylène) doit également progresser.

Ce développement des applications industrielles du froid dans de nombreux domaines a conduit à choisir des matériaux existants ou à mettre au point des matériaux nouveaux résistant de façon sûre aux sollicitations d'emploi à des températures de plus en plus basses. En particulier, il a été mis au point un procédé pour la confection d'enceintes de transport ou de stockage en tôles d'acier inoxydable gaufrées de faible épaisseur.

D'une manière générale, l'abaissement de température provoque une augmentation de la limite d'élasticité, de la dureté, du module d'élasticité des métaux et alliages ainsi que, sauf quelques exceptions, de la charge de rupture et de la limite de fatigue.

Corrélativement, les caractéristiques de ductilité (allongement en %, striction) ou de ténacité (résilience, résistance à l'effet d'entaille ou à la propagation des criques) diminuent. Pour certains alliages, ces dernières caractéristiques baissent assez brutalement dans un domaine de température relativement étroit; la température moyenne correspondante est la « température de transition » du matériau, dans les conditions d'essais utilisées. Le mode de rupture, qui était ductile, devient fragile.



UTILISATION DE DIVERS TYPES D'ACIERS
EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE D'EMPLOI

Pour un matériau donné, cette fragilité risque d'apparaître sous l'influence individuelle ou combinée de trois facteurs :

1 - abaissement de température,

2 - concentration (ou polyaxialité) des contraintes,

3 - augmentation de la vitesse de sollicitation.

Il est à remarquer que ces trois conditions sont réunies dans l'essai de résilience aux basses températures avec éprouvette du type Charpy à entaille en V. Cet essai commode et rapide reste actuellement le moyen le plus simple pour caractériser, en première approximation, la résistance à la rupture fragile du matériau aux basses températures (symbole : KCV). .

Les types d'aciers généralement utilisés en fonction de la température minimale d'emploi peuvent être classés en six groupes, délimités sur la figure ci-contre en fonction de la température d'emploi.

Il faut préciser que le premier groupe comprend comme aciers utilisables jusqu'à -50°C les nuances faiblement ou moyennement alliées ou du type ''maraging'', le cinquième la nuance courante à 9% de nickel employée jusqu'à -200°C et que le sixième groupe englobe les aciers austénitiques stables, stabilisés ou non, qui peuvent être utilisés jusqu'à -269°C (hélium liquide). A ces très basses températures, ces aciers austénitiques sont généralement utilisés à l'état hypertrempé, sauf pour les tôles qui sont souvent employées à l'état écroui afin d'augmenter leurs caractéristiques de résistance.

L'absence de « température de transition » confère aux aciers austénitiques une place de choix dans ce domaine, comparativement aux aciers ferritiques inoxydables ou non. Ils deviennent tenaces et ductiles, même à l'état écroui ou à l'état traité par précipitation structurale, et ceci jusqu'aux très basses températures. Ils peuvent être utilisés, soit à l'état hypertrempé, soit à l'état écroui.

Une autre propriété très intéressante est que, d'une manière générale, les soudures ont aussi un très bon comportement aux basses températures, pour autant que la quantité de phases fragilisantes (ferrite ou carbures) soit limitée, dans le cordon lui-même et dans la zone affectée par la chaleur.

Pratiquement, il est prudent de limiter au maximum à 0,08 % la teneur en carbone des aciers austénitiques utilisés à très basse température, et d'employer pour les assemblages soudés un métal d'apport dont la tendance ferritique ne dépasse pas 8 % (voir la définition page 102 en troisième partie).

Les propriétés aux basses températures des principaux aciers inoxydables austénitiques figurent sur les deux tableaux ci-après donnant à titre indicatif leurs propriétés physiques et leurs caractéristiques mécaniques (charge de rupture, limite d'élasticité, allongement, résilience).

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES AUX BASSES TEMPÉRATURES

(à titre indicatif)

Nuances UGINE (normes françaises)	Coefficient moyen de contraction entre 20° et θ° (10^{-6} par °C)			
	θ = —20 °C	θ = —70 °C	θ = —130 °C	θ = —196 °C
NS 22 S (Z 2 CN 18-10)	15,5	14,5	13,6	13
NS 21 A (Z 6 CN 18-09)	15,5	14,5	13,6	13
NS 21 C (Z 6 CNT 18-11)	15,5	14,8	14,1	13,2
NSMC (Z 8 CNDT 17-12)	14,8	14,1	13,3	12,8
NS 30 (Z 12 CNS 25-20)	14,4	14,1	13,5	12,6

Nuances UGINE (normes françaises)	Conductibilité thermique λ à θ °C (cal/cm-sec-°C)		
	θ = 20 °C	θ = —196 °C	θ = —253 °C
NS 22 S (Z 2 CN 18-10)	0,038	0,021	0,005
NS 21 A (Z 6 CN 18-09)	0,038	0,021	0,005
NS 21 C (Z 6 CNT 18-11)	0,036	0,018	0,005
NSMC (Z 8 CNDT 17-12)	0,033	0,017	0,005

Nuance UGINE (norme française)	Chaleur spécifique à θ °C (cal/g - °C)		
	θ = 20 °C	θ = —196 °C	θ = —253 °C
NS 21 A (Z 6 CN 18-09)	0,112	0,032	0,002

Les correspondances avec les normes étrangères des nuances UGINE et des normes françaises figurent sur les tableaux A2, A3 et A4 (pages 213, 214 et 215).

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES AUX BASSES TEMPÉRATURES

(à titre indicatif)

Nuances UGINE (normes françaises)	État	à 20 °C				à -196 °C (77 °K)				à -253 °C (20 °K)			
		R kgf/mm²	E kgf/mm²	A % sur 50 mm	KCV kgf-m/cm²	R kgf/mm²	E kgf/mm²	A % sur 50 mm	KCV kgf-m/cm²	R kgf/mm²	E kgf/mm²	A % sur 50 mm	KCV kgf-m/cm²
NS 22 S (Z 2 CN 18-10)	Hypertrempé	60	18	60	29	135	24	45	20	150	26	45	20
	Écroui pour 100 kgf/mm²	105	90	8	—	170	100	30	—	175	110	20	—
NS 21 A (Z 6 CN 18-09)	Hypertrempé	65	22	65	29	155	38	40	20	175	45	30	18
	Écroui pour 150 kgf/mm²	150	105	12	7	210	135	20	7	230	160	5	5
NS 21 P (Z 10 CN 18-09)	Hypertrempé	70	30	70	22	160	42	40	20	180	45	38	—
	Écroui pour 125 kgf/mm²	125	110	6	—	200	130	25	—	250	155	28	—
NSV (Z 8 CN 18-12)	Hypertrempé	55	20	60	30	125	25	50	20	140	30	45	20
NS 21 C (Z 6 CNT 18-11)	Hypertrempé	60	30	55	27	145	40	40	20	175	45	35	15
NSM 22 S (Z 2 CND 17-13)	Hypertrempé	60	22	60	20	120	30	55	15	145	40	55	12
NSM 21 (Z 6 CND 17-11)	Hypertrempé	60	25	60	20	125	50	55	15	160	60	55	12
NSMC (Z 8 CNDT 17-12)	Hypertrempé	60	27	55	30	135	50	55	20	170	60	50	12
NS 30 (Z 12 CNS 25-20)	Hypertrempé	55	20	60	25	105	50	70	20	130	65	70	—
FLUGIVAC 130 (Z 5 NCDTV 25-15)	Hypertrempé	65	30	30	15	105	50	55	13	125	70	55	—
	Durci structuralement	110	70	15	10	145	85	25	8	170	100	20	—

CONCLUSION

Cette énumération des principales nuances d'aciers inoxydables et de leurs caractéristiques, ainsi que de quelques-unes de leurs utilisations, montre la diversité de leur emploi.

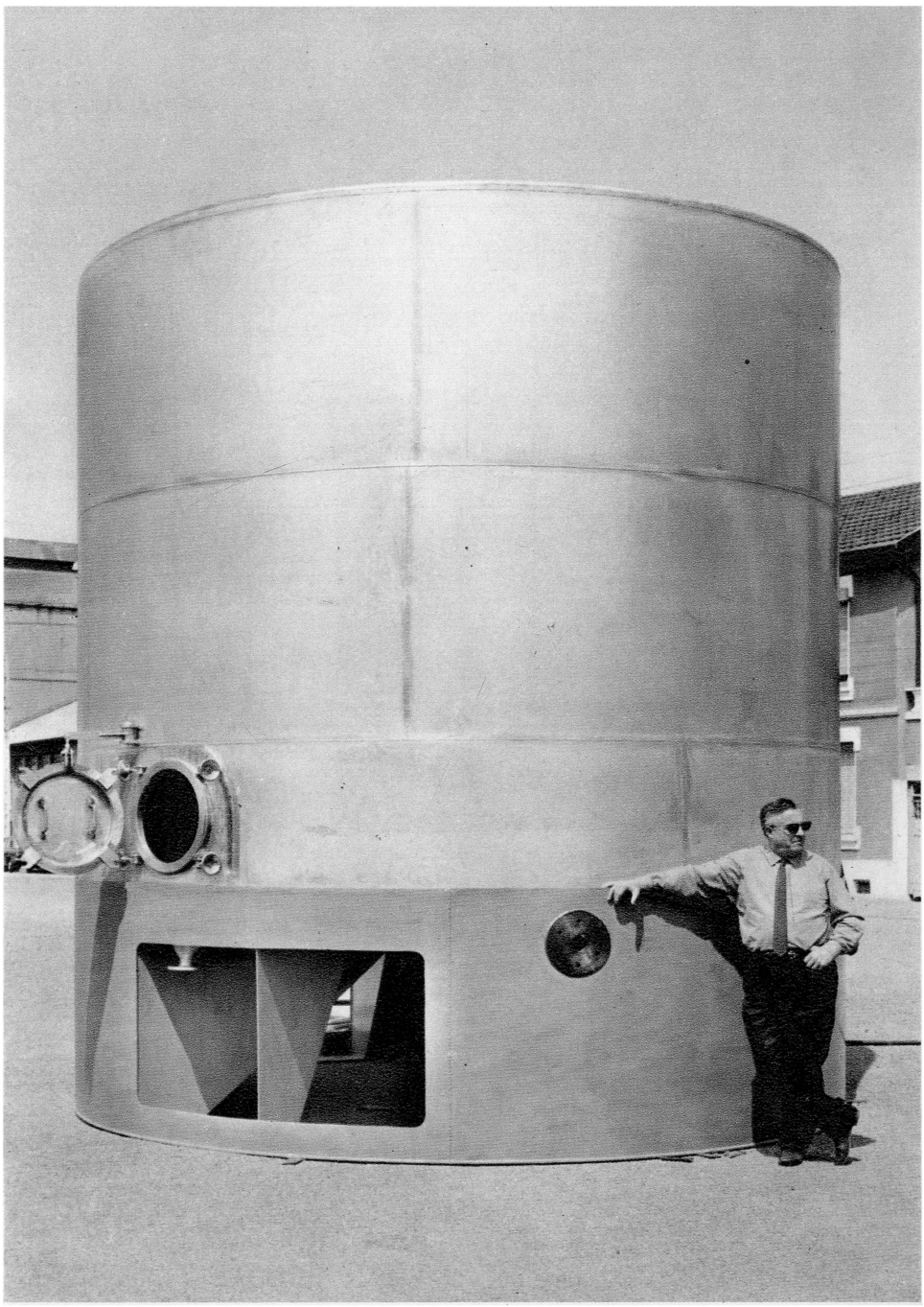
En chaudronnerie, la croissance de l'utilisation des aciers inoxydables a été moins rapide que sur le marché industriel français du fait que chaque construction chaudronnée en acier inoxydable est un cas qui demande à être étudié spécialement, en raison des conditions d'utilisation (chimique, thermique, mécanique) et des sujétions propres à la fabrication.

Pratiquement, ce sont surtout les aciers austénitiques au chrome-nickel et au chrome-nickel-molybdène qui sont utilisés en chaudronnerie, en raison de leurs remarquables propriétés qui répondent aux problèmes à résoudre, tant au point de vue de l'emploi que de la mise en œuvre.

Les aciers martensitiques ne sont pratiquement pas utilisés en raison de leur soudabilité difficile et de leur mauvaise formabilité.

Les aciers ferritiques sont employés pour des constructions bien déterminées, du fait d'un comportement mécanique notablement différent de celui des aciers austénitiques et de l'existence de quelques précautions relatives aux techniques d'assemblage.

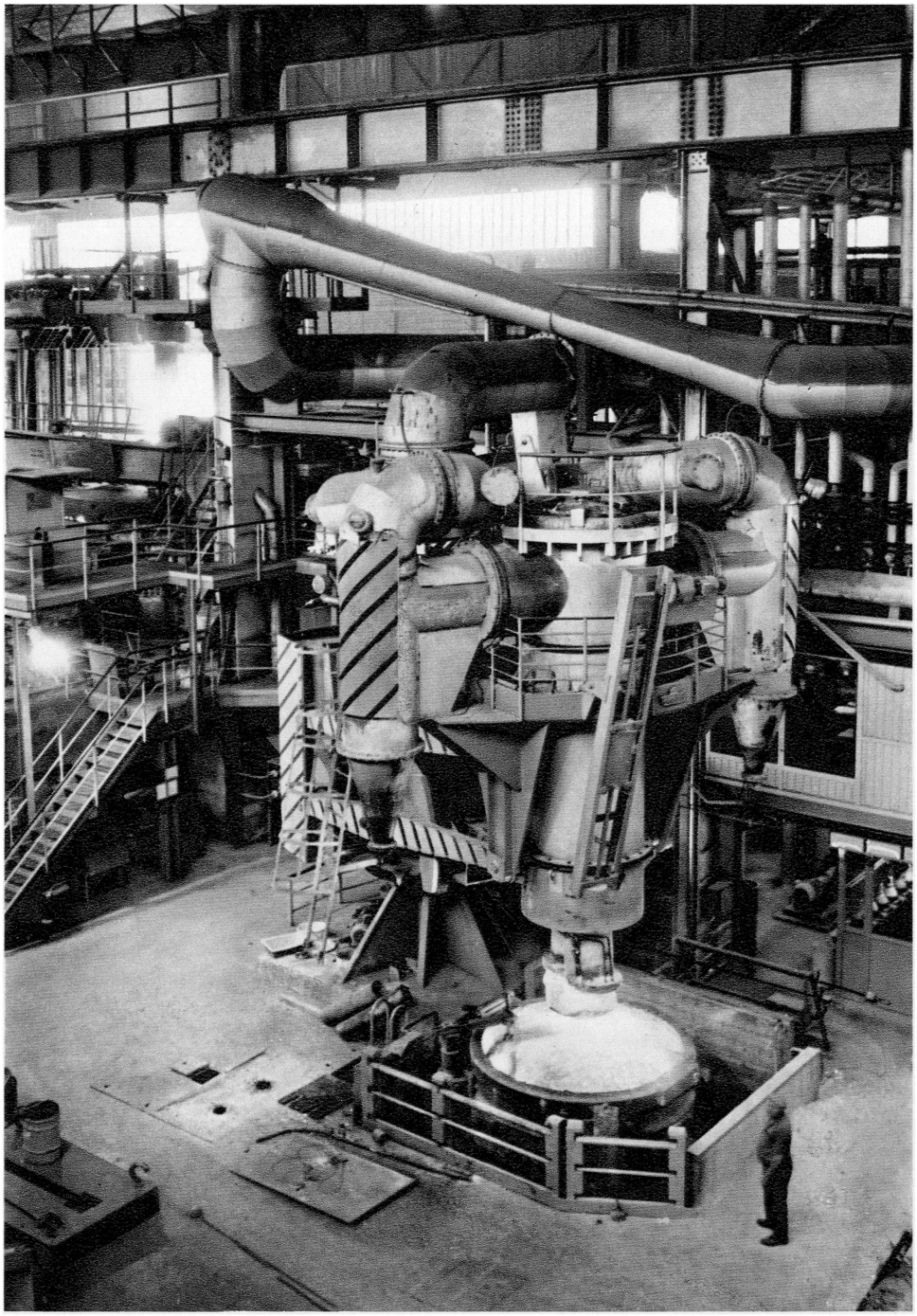
La deuxième partie, en définissant les propriétés des aciers inoxydables et en particulier le comportement exceptionnel des aciers austénitiques, montre la possibilité de développements importants donnant satisfaction aux utilisateurs les plus difficiles.



BAC DE 350 HECTOLITRES
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Deuxième partie

PROPRIÉTÉS DES ACIERS INOXYDABLES



INSTALLATION DE DÉGAZAGE SOUS VIDE (USINE D'UGINE)

Les aciers inoxydables ont pris dans l'industrie une place particulière en raison de propriétés qui les distinguent nettement des autres métaux, d'autant que les nuances existantes sont aussi différentes entre elles que le sont les diverses nuances des autres aciers spéciaux.

Ils possèdent d'abord une résistance à la corrosion exceptionnelle, à froid et à chaud, dans les conditions les plus diverses et dans des milieux très différents. Si certains de ces milieux sont peu corrodants, d'autres sont très actifs, et dans chaque cas il faut choisir une nuance d'acier inoxydable appropriée.

Les aciers inoxydables ont donc permis en chaudronnerie de réaliser des appareils qui durent longtemps sans qu'il soit utile de prévoir des surépaisseurs de corrosion, ce qui conduit très généralement à une diminution d'épaisseur. L'abaissement du poids des appareils qui en résulte diminue le coût des transports, facilite les opérations de nettoyage et l'installation des appareils.

Les propriétés physiques des aciers contenant 13% et 17% de chrome sont comparables à celles des aciers ordinaires. Les aciers austénitiques se caractérisent par leur amagnétisme, leur faible conductibilité thermique, leur coefficient de dilatation élevé et une résistivité électrique assez importante.

De plus, les aciers inoxydables présentent une grande aptitude au polissage qui offre un certain intérêt pour la résistance à la corrosion et en fait un matériau de choix lorsqu'ils sont utilisés à des fins décoratives.

Leurs caractéristiques mécaniques sont précieuses dans de nombreux emplois; les aciers austénitiques, en particulier, possèdent un ensemble de qualités exceptionnelles:

— résistance à la corrosion par l'atmosphère et par la plupart des milieux chimiques au voisinage de la température ambiante, ainsi que résistance à l'oxydation aux hautes températures,

— caractéristiques mécaniques particulièrement élevées après travail à froid,

— ductilité qui atteint celle de métaux tels que le cuivre, le laiton, etc.

Ainsi, compte tenu de la limite d'élasticité, les allongements des aciers inoxydables sont très élevés. Certaines pièces compliquées s'emboutissent beaucoup plus facilement lorsqu'elles sont exécutées en acier inoxydable au lieu de l'être avec un autre matériau courant.

L'utilisateur a donc la possibilité de porter son choix sur une nuance qui lui donnera, au point de vue prix, le meilleur rapport pour le service rendu.

Chapitre VI

CORROSION EN MILIEU LIQUIDE

Dans de nombreux récipients à pression, les risques de corrosion peuvent être plus importants que dans des constructions métalliques courantes, du fait des produits qu'ils reçoivent ou des conditions de leur service.

Dans les cas simples, peuvent convenir les protections classiques, en particulier peinture, émaillage, placage avec un autre métal ou rechargement, métallisation, protections toujours précaires qui peuvent être détruites par accident mécanique et par usure.

Or, la corrosion qui apparaît, soit en milieu non ionisé (voie sèche), soit en milieu ionisé (voie humide par présence d'eau à l'état liquide ou de vapeur d'eau condensable), a de tels effets que l'utilisation des aciers inoxydables appropriés constitue la solution idéale pour la prévenir.

1 - NATURE DE LA CORROSION

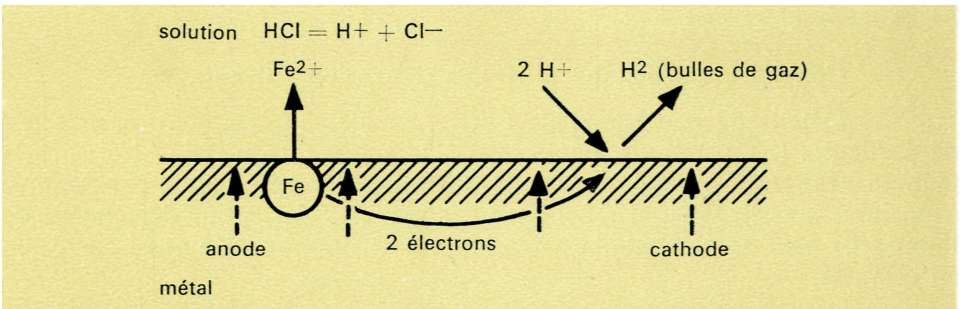
Les métaux, à l'exception des métaux précieux tels que l'or et le platine, que l'on trouve à l'état naturel, sont toujours extraits des minerais et ont donc tendance à s'altérer au contact de l'atmosphère, des eaux et des divers milieux corrosifs utilisés dans l'industrie, pour retourner progressivement à un état combiné, analogue au minerai.

Ces processus de dégradation des métaux constituent le phénomène de corrosion. Ils se déroulent par des mécanismes complexes, de nature électrochimique.

Ceci veut dire, par exemple dans le cas d'une corrosion en milieu aqueux, qu'il apparaît à la surface du métal un système de couples anode-cathode, autrement dit un système de piles électriques.

La figure ci-contre représente l'une de ces piles, lors de la corrosion du fer par l'acide chlorhydrique HCl. A l'anode le fer passe en solution sous forme d'ions ferreux Fe^{2+}, en libérant deux électrons.

On ne peut accumuler d'électrons dans une région d'un système conducteur; pour que cette mise en solution du fer puisse se développer, il est donc nécessaire que les électrons libérés soient consommés par une deuxième réaction, qui aura lieu sur la cathode. Dans le cas présent, les électrons se combineront aux ions H^+, contenus dans l'acide chlorhydrique et lui confèrent ses propriétés acides; il y aura libération d'hydrogène gazeux (molécules H_2).



ATTAQUE DU FER PAR L'ACIDE CHLORHYDRIQUE

Bien d'autres corps chimiques sont susceptibles de se combiner avec les électrons sur les plages cathodiques. On citera en premier lieu l'oxygène atmosphérique dissous dans les milieux corrosifs.

Nature des plages anodiques et cathodiques:

1° - Toute différence d'état physique ou d'état chimique entre deux points de la surface du métal pourra donner naissance à une pile : le point où la dissolution du métal sera plus facile deviendra l'anode et l'autre point deviendra la cathode.

Or, les métaux et alliages industriels ne sont jamais parfaitement homogènes à l'échelle microscopique. C'est ainsi qu'un acier au chrome, par exemple, contiendra toujours des carbures disséminés dans la matrice.

On aura donc de ce fait une possibilité de corrosion, basée sur l'existence de piles à l'échelle microscopique et concernant le demi-produit (barres, tôles, etc.) livré par le métallurgiste.

Pour les applications de résistance à la corrosion, le métallurgiste obtiendra, en particulier par des traitements thermiques convenables, l'homogénéité maximale, dans les limites imposées par la nature du matériau et ses autres propriétés d'emploi (propriétés mécaniques, etc.).

2° - Mais la conception et la fabrication des constructions chaudronnées peuvent introduire des différences supplémentaires d'état physique ou chimique entre un point et un autre. Ces différences engendreront également des piles, nouveaux facteurs de corrosion; ces piles sont alors de dimensions « macrographiques ».

On citera :

a) Facteurs physiques :

— Écrouissages locaux (coups de meules, congés d'emboutissage, etc.),

— Différences locales de température : corrosion thermogalvanique.

b) Facteurs chimiques :

— Contact entre métaux différents (corrosion galvanique),

— Dépôts de matière solide (tartre, rouille exogène, etc.) ou présence de particules (incrustations, poussières) à la surface du métal. Ainsi sous la matière étrangère au métal ou dans des interstices, correspondant par exemple à un joint non étanche, et aussi dans des recoins (conception défectueuse de l'appareil) peut se produire la corrosion caverneuse, appelée aussi corrosion en crevasse.

Dans de telles « cavernes », le liquide corrosif a des difficultés à se renouveler, ce qui peut conduire pour certains constituants du liquide à des différences de concentration entre l'intérieur et l'extérieur de la caverne. On rencontrera donc également dans ce cas une hétérogénéité du milieu corrosif, cette fois donnant lieu à une pile. Le plus souvent, le métal à l'intérieur de la caverne devient anodique et se dissout.

En particulier, quand l'oxygène dissous dans la solution se trouve à des concentrations différentes à l'intérieur et à l'extérieur de la caverne, on constitue une « pile d'aération différentielle ».

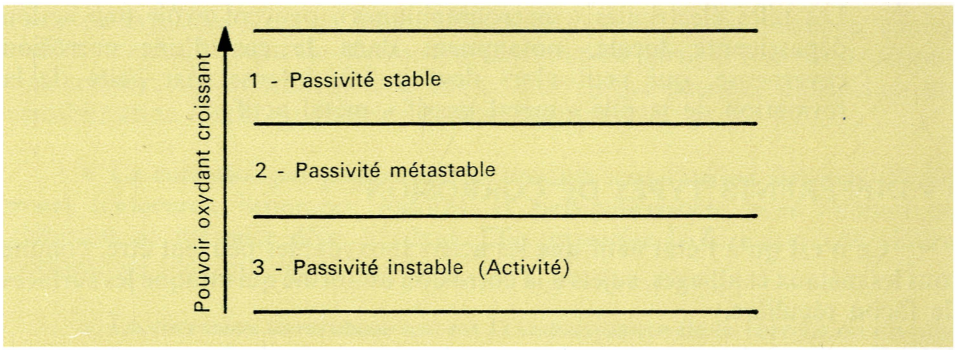
Les facteurs « macrographiques » de corrosion qui viennent d'être passés en revue agiront avec plus ou moins d'intensité suivant les circonstances; on ne peut donner de règle générale, et, dans chaque cas, on ne peut décider de leur importance que par une étude électrochimique précise, ou bien par une expérience substantielle, acquise sur des cas similaires. Ces facteurs devront être éliminés au maximum par **une conception judicieuse et une construction soignée des appareils** : on se rappellera que, très souvent, ils peuvent représenter la cause déterminante du succès ou de l'échec.

2 - PHÉNOMÈNES DE PASSIVITÉ

On sait que tous les métaux immergés dans des milieux suffisamment oxydants peuvent présenter le phénomène de passivité. Le fer, en particulier, est passif dans l'acide nitrique très concentré; sa surface est alors recouverte d'un film protecteur, invisible et très mince, contenant de l'oxygène, et il n'y a pratiquement pas de corrosion.

Or, on sait que l'addition de 11,5 % au moins de chrome, permet d'obtenir l'état passif, dans un nombre de milieux infiniment plus élevé, moins oxydants.

Cette propriété forme la base de la résistance à la corrosion des aciers inoxydables et c'est la stabilité de la couche passive qui en constitue le facteur déterminant. L'expérience pratique, ainsi que les études électrochimiques, ont montré qu'à ce point de vue les milieux corrosifs pouvaient être classés en trois catégories (figure ci-contre) :



PASSIVITÉ EN FONCTION DU POUVOIR OXYDANT

a) - Passivité stable - Elle se trouve réalisée dans les milieux nettement oxydants. Dans ce domaine, toute dépassivation accidentelle se réparera spontanément.

b) - Passivité métastable - Dans ce cas, une dépassivation accidentelle ne se réparera pas d'elle-même; il en est ainsi dans des milieux moins oxydants que précédemment.

c) - Passivité instable (ou activité stable) - Dans les milieux insuffisamment oxydants, toute couche passive existant initialement à la surface de l'acier finira par se détruire et le métal sera attaqué.

Remarques :

— Dans les milieux exceptionnellement oxydants, par exemple dans l'acide nitrique contenant en solution du chrome hexavalent, on observe également une corrosion de l'acier inoxydable : c'est le phénomène de transpassivité.

— Les éléments d'alliage ajoutés aux aciers au chrome seul (nickel, molybdène, cuivre, etc.) agrandissent le domaine de la passivité stable. Ils permettent donc l'utilisation des aciers inoxydables dans des milieux moins oxydants.

— L'état de surface initial peut être considéré également comme ayant une action sur la frontière de la passivité stable. L'obtention de celle-ci sera favorisée par les traitements de décontamination et de passivation (voir en troisième partie, page 120).

— Les considérations précédentes ne sont pas valables en présence des solutions contenant des ions halogènes (chlorures, bromures, iodures), qui peuvent provoquer des destructions locales de la passivité (voir plus loin : corrosion par piqûres, corrosion sous tension).

— Les piles électriques « macrographiques » peuvent avoir une action dépassivante locale, notamment dans le cas d'une corrosion caverneuse, qui peut alors devenir très intense, par suite de la formation de la pile « métal passif - métal actif ».

3 - DIFFÉRENTS TYPES DE CORROSION

Ce n'est qu'à l'état actif que les aciers inoxydables peuvent être, comme tous les métaux et alliages, sujets à la corrosion uniforme qui attaque les surfaces de façon régulière.

Dans certains cas, ils sont sensibles à des types de corrosions plus complexes :

• **la corrosion intercristalline** qui peut affecter les aciers inoxydables austénitiques et qui ne se présente en service que dans des circonstances exceptionnelles. Elle consiste en un cheminement de la corrosion le long des joints des grains, aboutissant, à la limite, à une véritable désagrégation de l'acier; elle est aussi appelée intergranulaire.

Il ne peut y avoir corrosion intercristalline que si les trois conditions suivantes sont remplies simultanément :

— teneur en carbone insuffisamment faible pour limiter la formation de carbures de chrome à un niveau pratiquement nul; cette teneur en carbone est fonction du milieu ambiant et du gradient de température au passage de la zone de sensibilisation évoquée ci-dessous; en pratique, la majorité des problèmes est résolue en fixant le maximum à 0,03 %;

— aciers sensibilisés au cours d'un maintien suffisamment prolongé entre 500 et 800 °C;

— milieux acides donnant une très faible corrosion uniforme et présentant un pouvoir oxydant compris entre des limites assez étroites.

La question a été résolue, soit en abaissant la teneur en carbone à moins de 0,03 % (nuances UGINE NS 22 S, NS 22 A, NSM 21 S, NSM 22 S, NSM 23, NSCD), soit par une addition d'éléments stabilisants plus avides de carbone que de chrome :

— Titane (NS21 S, NS21 C, NSMC) avec un rapport Ti/C supérieur ou égal à 4.

— Niobium (NS 95) avec un rapport Nb/C supérieur ou égal à 8.

Les rapports Ti/C et Nb/C sont établis d'après les résultats d'une longue expérience de la fabrication de tels aciers.

Les producteurs fournissent des aciers inoxydables ayant subi un traitement thermique qui les rend insensibles à la corrosion intercristalline, dans

l'état de livraison. Ce sont les opérations de mise en œuvre (soudage, conformation à chaud, recuit de détente portant tout ou partie d'une construction à une température comprise entre 500 et 800 °C) qui peuvent déclencher une sensibilisation locale ou générale à cette corrosion.

• **La corrosion par piqûres** qui se produit sous l'action des ions d'halogènes (chlorures, bromures, iodures) et particulièrement sous l'action des chlorures en présence d'un oxydant. Elle provoque la formation de piqûres perforantes plus ou moins rondes.

• **La corrosion caverneuse** qui est la conséquence de la formation de piles locales sur le métal. C'est en présence d'ions halogènes que la corrosion caverneuse est la plus critique et conditionne souvent le succès ou l'échec. Il convient même alors d'obtenir une surface aussi bien polie que possible.

• **La corrosion sous tension** des aciers inoxydables austénitiques peut conduire à la mise hors service des appareils par fissuration démarrant après une période d'incubation qui peut être longue, puis se propageant rapidement (corrosion fissurante). Elle peut se produire lorsqu'existent :

- des tensions mécaniques, soit résiduelles (soudage, emboutissage, etc.), soit créées en service;
- un milieu générateur de corrosion sous tension, généralement pour l'acier inoxydable, les chlorures alcalins ou alcalino-terreux en solution chaude.

On sait que la présence de milieux corrosifs abaisse la limite de fatigue qui caractérise la résistance aux efforts alternés (vibrations, chocs thermiques répétés, etc.). On dit alors qu'il y a fatigue sous corrosion.

Les fissures de fatigue sous corrosion se distinguent difficilement des fissures de corrosion sous tension statique; mais les circonstances d'apparition des deux phénomènes sont différentes. En particulier, il semble que la présence de chlorures ne soit pas nécessaire pour la fatigue sous corrosion, par exemple dans la vapeur.

Des cas particuliers de corrosions (corrosion incisive ou en lame de couteau) peuvent également exister lors d'emploi de certaines solutions, par exemple en présence d'acide nitrique concentré bouillant et surtout de condensation de vapeurs nitreuses; les aciers inoxydables stabilisés au titane ou au niobium ne conviennent pas. Il faut alors utiliser des aciers inoxydables à très bas carbone ($C < 0{,}03\,\%$) non stabilisés.

Il peut arriver que le frottement dû à une circulation trop rapide d'un fluide corrosif empêche la formation de la couche passivante et occasionne des pertes de métal par corrosion; il peut en être ainsi dans les coudes, branchements et joints de tuyauteries et aux abords des creux ou bosses de l'envers des soudures. Un meilleur tracé pallie ces inconvénients.

Chapitre VII

CORROSION EN MILIEUX GAZEUX, VISQUEUX OU LIQUIDES AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

1 - TEMPÉRATURES PEU ÉLEVÉES

Dans la plupart des cas, aux températures inférieures à 300 °C, les aciers inoxydables ne subissent aucune corrosion quand les gaz sont rigoureusement anhydres.

En présence d'humidité, même en faible proportion, les réactions chimiques entre certains gaz et l'eau permettent la reconstitution d'éléments susceptibles de corroder les aciers inoxydables selon les systèmes d'évolution mentionnés ci-dessus. En cas notamment de condensations, les parois sont mises localement au contact de milieux liquides dont l'action est d'autant plus insidieuse que les conditions de température et de concentration sont mal connues.

2 - TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Les aciers inoxydables appelés réfractaires sont utilisés pour leur résistance aux attaques chimiques aux températures élevées. Des essais de laboratoire permettent de les classer en vue d'essais industriels et d'étudier leur comportement dans les milieux **gazeux, solides** ou **visqueux** et **liquides.**

a) **Milieux gazeux**

Atmosphère oxydante

La présence de chrome dans l'acier est la condition primordiale de la résistance à l'oxydation, car la pellicule d'oxyde de chrome formée au début en ralentit considérablement la progression. L'addition d'aluminium et de silicium permet d'accroître l'effet protecteur apporté par le chrome.

Lorsque la teneur en nickel ne dépasse pas 25 % environ, l'adhérence et la continuité du film protecteur sont facilement détruites par des réactions se produisant à l'interface métal-oxyde. Il en résulte que ces aciers subissent généralement l'oxydation comportant des périodes d'accélération et qu'ils sont assez sensibles aux variations de la température. Les nuances à teneur en nickel dépassant 25 % environ résistent mieux à l'oxydation grâce à la meilleure adhérence de leurs oxydes.

Des additions telles que le tungstène et surtout le molybdène limitent la résistance à l'oxydation des aciers austénitiques classiques à cause de la formation d'oxydes volatils, mais ce phénomène complexe dépend de l'aération et de la composition exacte du milieu gazeux en contact avec le

métal. En présence de teneurs élevées en nickel et en chrome (Ni > 40 % et Cr > 18 %), ces mêmes additions ont un effet négligeable ou même favorable par suite de la formation de combinaisons stables d'oxydes.

Atmosphère oxydante sulfureuse

Dans ces milieux, les vitesses d'oxydation de toutes les nuances d'acier inoxydable sont généralement plus élevées, sans modification majeure de leur mérite relatif; ce phénomène est d'autant plus sensible que la teneur en nickel est plus élevée. On utilise, en particulier pour les pièces de four, les aciers ferritiques à haute teneur en chrome (par exemple la nuance UGINE DY à 28 % de chrome).

Atmosphères réductrices à base d'hydrogène

Les aciers ordinaires subissent généralement une décarburation et quelquefois une fragilisation intergranulaire. La décarburation est nettement réduite par addition de chrome, d'où l'intérêt des aciers martensitiques de 3 à 9 % de chrome pour l'industrie pétrolière. Une stabilisation supplémentaire du carbone est obtenue par des additions de vanadium, titane ou niobium et ces deux dernières sont particulièrement utiles dans le cas de la synthèse de l'ammoniac car elles diminuent également la fragilité résultant de la nitruration.

La résistance des aciers et alliages austénitiques à la nitruration est relativement améliorée par une teneur en chrome dépassant 20 %. Des additions d'aluminium et de silicium apportent une contribution importante à cette résistance, surtout si le métal peut être préoxydé avant sa mise en service.

Le nickel diminue la vitesse de pénétration de l'azote jusqu'à 1.000°, et si la teneur en nickel dépasse environ 65 %, la nitruration est très atténuée.

Milieux gazeux alternativement réducteur et oxydant

C'est le cas de la cémentation gazeuse; les aciers se détériorent souvent par le phénomène de « carie verte » dans lequel la fixation du chrome par cémentation rend cet élément indisponible pour protéger le métal contre l'oxydation. Les nuances à teneurs équilibrées en chrome, nickel et fer sont recommandées et les additions de silicium et niobium sont favorables.

Une détérioration analogue, généralement très rapide, se rencontre dans les atmosphères oxydantes contenant des traces de vapeurs chlorurées, bromurées ou fluorées. Le choix économique d'une nuance pour ces applications dépend étroitement de l'analyse très complète du milieu gazeux.

b) **Milieux visqueux ou solides**

Les fines particules de cendres, les escarbilles ou les matériaux divers souvent produits par la combustion des fuels impurs, des charbons pulvérisés et de certains gaz, peuvent entraîner à haute température une corrosion accélérée, souvent appelée « oxydation catastrophique ».

L'augmentation de la teneur en chrome est la méthode la plus efficace pour accroître dans ces conditions la résistance à la corrosion.

En présence de composés purement oxydants, par exemple oxyde vanadique dans le cas des fuels, les oxydes protecteurs du métal se combinent avec eux pour former des eutectiques fusibles qui entraînent une accélération de l'oxydation. L'augmentation des teneurs en chrome et en nickel est favorable à la tenue du métal et il est recommandé de choisir, dans les cas les plus sévères, une teneur en chrome d'au moins 25 % et une teneur en nickel d'au moins 40 %. Les additions de silicium et de titane réduisent la formation des eutectiques fusibles. Certains antidotes ajoutés au fuel permettent de limiter l'effet nocif des impuretés en les fixant sous une forme non agressive.

Sous l'action des sulfates complexes, généralement seuls dans la combustion des charbons sales, ou en présence d'oxyde vanadique dans la combustion des fuels impurs, le comportement des différentes nuances est étroitement lié aux conditions locales de corrosion. Étant donné l'adhérence des dépôts de cendres, généralement visqueux, tout se passe comme si ces conditions étaient simultanément oxydantes et réductrices, de sorte que la détérioration du métal est souvent apparentée à une « carie verte » avec action supplémentaire du soufre. Avec les teneurs en chrome usuelles des aciers résistant à chaud, le nickel a ici une influence très défavorable. Sa présence est par contre tolérable dans des alliages nickel-chrome-fer à condition que la teneur en chrome soit suffisante. En général, le métal se comporte de façon convenable lorsque la teneur en chrome dépasse 25 %.

Des cas d'« oxydation catastrophique » locale sont souvent provoqués par des contacts du métal, soit avec un autre métal, soit avec des produits scorifiants, par exemple, des réfractaires contenant des produits silicieux (mica, amiante, liant de réfractaires, etc.), des oxydes alcalins, de l'acide borique ou du plâtre (sulfate de calcium). Si ces phénomènes parasites ne peuvent pas être entièrement évités, l'augmentation de la teneur en chrome améliore généralement les performances de l'alliage. Certains agents contaminant la surface du métal, tels que des résidus de lubrifiant mal éliminés, ou des dépôts calcaires d'eaux de lavage, sont souvent responsables d'oxydations locales accélérées, spécialement dans le cas du traitement thermique à très haute température de certains alliages.

c) **Milieux liquides**

Les aciers réfractaires résistent généralement de façon satisfaisante à la plupart des sels fondus jusqu'à une certaine température; en particulier, la corrosion par les sels réducteurs (cyanures, chlorures) reste très limitée. Des corrosions localisées et quelquefois sévères peuvent se produire si les conditions sont localement oxydantes et réductrices en alternance, par exemple à la surface de séparation des bains de sels avec l'atmosphère, ou par apparition de produits de décomposition des bains.

La nature et l'intensité de l'attaque par les métaux fondus dépendent principalement de la pureté du métal liquide considéré.

Chapitre VIII

DÉTERMINATION QUANTITATIVE DE LA CORROSION

On exprime le plus souvent le résultat d'un essai de corrosion conventionnel par la perte de poids par unité de surface et par unité de temps. L'unité la plus courante en Europe est le gramme par mètre carré et par heure ($g/m^2/h$). On rencontre aussi le milligramme par décimètre carré et par 24 heures : $mg/dm^2/24$ h (1 $g/m^2/h$ = 240 $mg/dm^2/24$ h).

Pour estimer la durée de vie d'un appareil chaudronné, on peut exprimer la vitesse de corrosion en mm/an. Pour les aciers inoxydables, 1 mm/an est approximativement égal à 1 $g/m^2/h$.

Il est évident que ces indications ne sont vraiment valables que pour la corrosion uniforme. On conçoit par exemple que le percement d'une tôle par des piqûres puisse correspondre à une perte de poids relativement très faible.

Les essais électrochimiques constituent une acquisition scientifique essentielle de ces dernières années. Leur utilisation s'est révélée comme indispensable pour l'étude rationnelle de la résistance à la corrosion des aciers inoxydables.

On peut ainsi suivre et étudier les conditions électrochimiques qui règnent à la surface d'un acier inoxydable exposé à un milieu corrosif donné, apprécier le degré de stabilité de la passivité, le danger de destruction locale de cette passivité (piqûres, etc.) et notamment le danger venant des piles électrochimiques macrographiques provenant de la conception et de la réalisation d'un appareil donné (corrosion galvanique, corrosion caverneuse, etc.).

On doit toutefois ajouter que les essais électrochimiques exigent une longue expérience et de fortes bases théoriques pour être correctement conçus et interprétés.

- **Tables de corrosion**

Afin de renseigner les utilisateurs d'acier inoxydable, nous avons fait figurer dans des tableaux, appelés tables de corrosion, les nuances d'acier inoxydable que nous conseillons de choisir dans tous les milieux connus qui peuvent être corrosifs.

Ces tables se trouvent page 201 en tête de l'ensemble des tableaux composant la septième partie.

Il est essentiel de préciser que les renseignements fournis dans ces tables n'ont qu'un caractère d'orientation. Dans la plupart des cas, ils découlent d'essais de laboratoire, souvent électrochimiques, mais effectués sur éprouvettes immergées dans des produits purs.

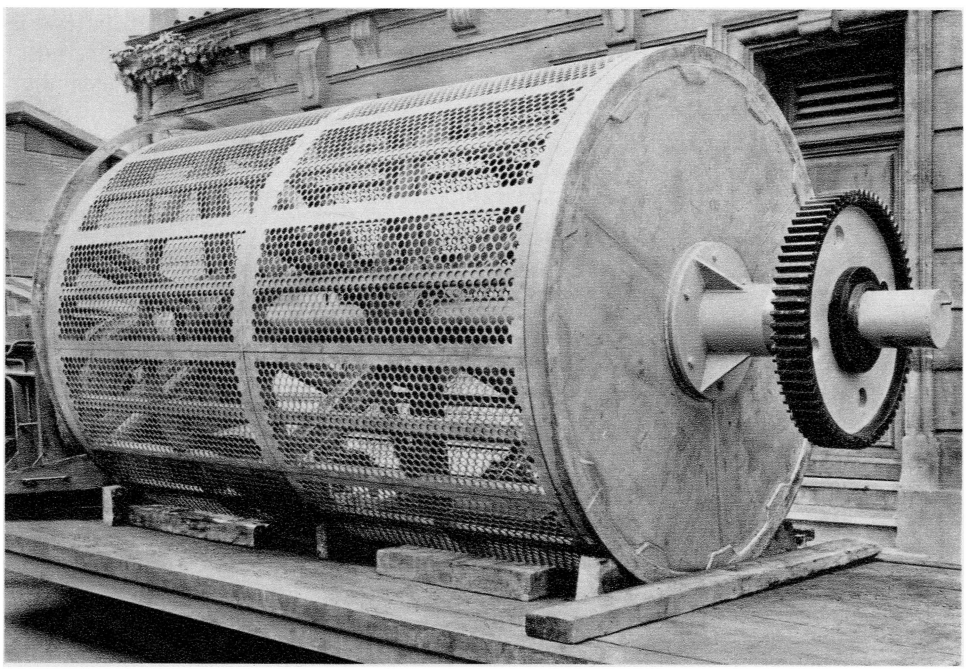
Or, les produits industriels impurs peuvent se comporter différemment des produits purs. De plus, il convient de tenir compte :

— des « paramètres industriels » de la corrosion (circulation, agitation, fréquence de renouvellement du milieu corrosif, contraintes, vibrations, etc.),

— des piles « macrographiques » éventuelles (corrosion caverneuse, galvanique, etc.), facteurs supplémentaires de corrosion.

Les préconisations des tables constituent donc une première indication qui doit être confirmée en nous consultant et en nous précisant alors toutes les conditions de fonctionnement de l'installation prévue : nature exacte du milieu (température, concentration, pression), modes de construction et d'exploitation du matériel envisagé.

Dans le cas de problèmes nouveaux, importants et délicats, il pourra être nécessaire de recourir à une étude électrochimique détaillée, conduite par nos spécialistes confirmés.



TAMBOUR POUR PAPETERIE
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

Chapitre IX

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ACIERS INOXYDABLES

Certaines propriétés physiques des aciers inoxydables sont différentes suivant qu'il s'agit des aciers martensitiques à 13 % de chrome, des aciers ferritiques à 17 % de chrome et des aciers austénitiques au chrome-nickel.

Le tableau ci-dessous compare quelques propriétés physiques classiques des nuances UGINE correspondant aux trois catégories d'aciers inoxydables.

Nuances UGINE	Martensitiques	Ferritiques	Austénitiques	
	Acier à 13 % Cr	Acier à 17 % Cr	Acier 18-10	Acier 18-12-Mo
	FI-U12-P12	**F 17**	**NS 21 AS**	**NSM 21**
Poids spécifique (g/cm³) .	7,7	7,7	7,9	7,9
Point de fusion (°C)	1.490	1.490	1.450	1.400
Chaleur spécifique (cal/g. °C) à 20 °C.....	0,12	0,12	0,12	0,12
Conductibilité thermique (cal. cm/cm². s. ° C) à 20 °C	0,06	0,06	0,038	0,037
Coefficient moyen de dilatation linéaire entre 20 et 100 °C	11×10^{-6}	11×10^{-6}	$17{,}3 \times 10^{-6}$	16×10^{-6}
Résistivité électrique (microhm cm²/cm) à 20 °C	55	60	70	73
Magnétisme à l'état adouci par hypertrempe	ferro magnétique	ferro magnétique	amagnétique	amagnétique
Perméabilité magnétique initiale réversible maximum			1,03	1,03

Les propriétés physiques des aciers à 13 et 17 % de chrome sont à peu près comparables à celles des aciers ordinaires, mais par contre, les aciers austénitiques 18-10, les plus utilisés en chaudronnerie, sont donc caractérisés par leur amagnétisme, leurs faibles conductibilités thermique et électrique et leur coefficient de dilatation élevé.

Remarque : Les quatre nuances dont les propriétés figurent au tableau ci-dessus doivent être considérées comme des exemples types. Notre catalogue des aciers inoxydables comprend pour chacune de nos nombreuses nuances une notice donnant la liste détaillée de ses propriétés physiques, dans des domaines de températures propres à son emploi.

Chapitre X

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ACIERS INOXYDABLES

Les tableaux des chapitres III et IV ont indiqué les valeurs des principales caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables employés à froid et des aciers et alliages pour travail à températures élevées. Mais, pour bien utiliser le métal livré, il est important de se rappeler que les propriétés mécaniques des aciers inoxydables, et en particulier la capacité de consolidation de certains d'entre eux, posent des problèmes lorsqu'il faut interpréter les résultats obtenus par les essais mécaniques usuels.

Il est donc utile de préciser ces points particuliers qui concernent les caractéristiques mécaniques déduites des essais de traction.

En tout cas, il faut encore distinguer les aciers à 13 % de chrome, ceux à 17 % de chrome et les aciers austénitiques au chrome-nickel. Les deux premières catégories sont comparables du point de vue mécanique aux aciers ordinaires ferritiques.

Par contre, les aciers austénitiques ont des propriétés originales, qui vont être explicitées, car s'ils ont donné satisfaction jusqu'à maintenant, cela ne signifie pas forcément qu'on en ait tiré le meilleur parti tant sur le plan technique que sur le plan économique.

Pour bien définir le comportement mécanique particulier de la structure austénitique et de la détermination précise de la limite d'élasticité $E_{0,2}$, il sera précisé comment doivent être interprétées les mesures des caractéristiques mécaniques par l'essai de traction par comparaison avec celles faites avec l'acier ordinaire.

Il est en effet logique que le calcul des récipients chaudronnés en acier inoxydable austénitique soit basé sur le comportement réel de ces aciers.

Les caractéristiques mécaniques usuelles déduites de l'essai de traction conventionnel sont les suivantes :

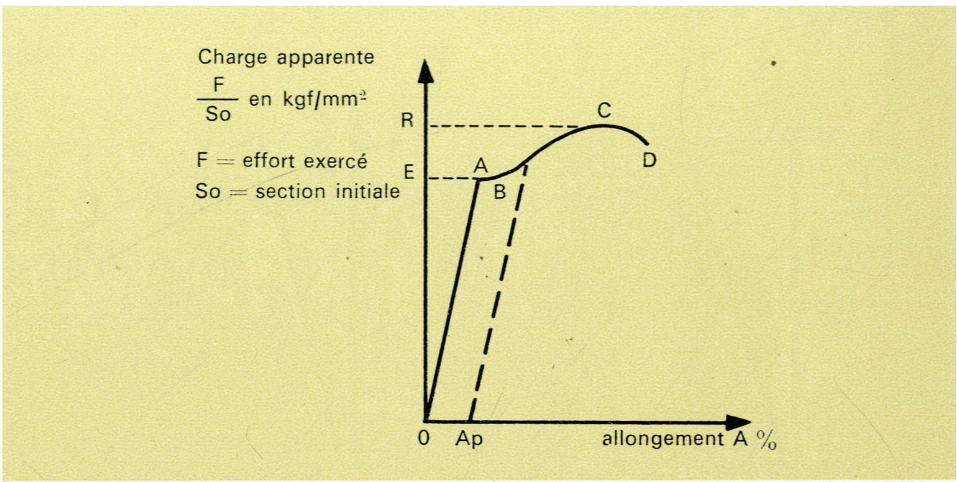
— Caractéristiques de résistance : charge de rupture, limite d'élasticité ou limite conventionnelle à allongement rémanent donné; les valeurs correspondantes sont des efforts unitaires, c'est-à-dire des charges totales supportées par l'éprouvette de traction divisées par la section **initiale** de l'éprouvette et non des contraintes.

— L'allongement de rupture et la striction qui sont des caractéristiques de ductilité.

1 - MESURE DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES CONVENTIONNELLES

a) **Charge de rupture et limite d'élasticité**

La définition de la charge de rupture R et de la limite d'élasticité E est rappelée par la figure qui représente la courbe de traction d'un acier ordinaire. Cette courbe comporte une partie rectiligne OA qui définit la limite d'élasticité E de l'acier.



COURBE DE TRACTION D'UN ACIER ORDINAIRE

Pour toute charge inférieure à E, les allongements sont proportionnels aux efforts et l'allongement revient à une valeur nulle lorsque l'on fait cesser l'effort.

La pente de la droite OA permet de définir également le module d'élasticité de cet acier. On notera que cette définition n'a de valeur que dans le domaine élastique, et que de tels aciers ne sont d'ailleurs utilisés que pour des contraintes inférieures à E.

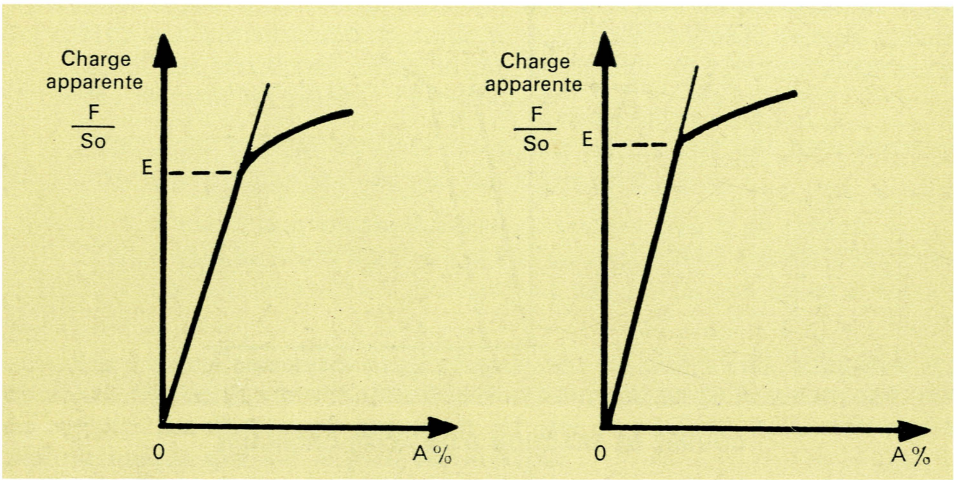
Dans la partie ABC de la courbe de traction, appelée domaine plastique, l'allongement n'est plus proportionnel à l'effort, et il ne revient pas à zéro lorsque l'effort est supprimé, mais à une valeur Ap en décrivant une droite sensiblement parallèle à OA.

Dans toute la région ABC, la déformation plastique de l'éprouvette est uniformément répartie sur toute sa longueur, puis la striction localisée apparaît pour un effort unitaire R, à partir duquel l'effort diminue jusqu'au point D où la rupture se produit. Par définition, la charge de rupture est

égale à R : c'est l'effort maximal supporté par l'éprouvette divisé par la section **initiale** de celle-ci.

b) **Aciers ferritiques et martensitiques**

Les aciers inoxydables ferritiques ou martensitiques ont une courbe de traction analogue à celle des aciers au carbone évoqués ci-dessus, bien que la transition entre le domaine élastique et le domaine plastique soit souvent moins nette, le domaine d'instabilité étant pratiquement supprimé; elle affecte les formes des figures ci-dessous.

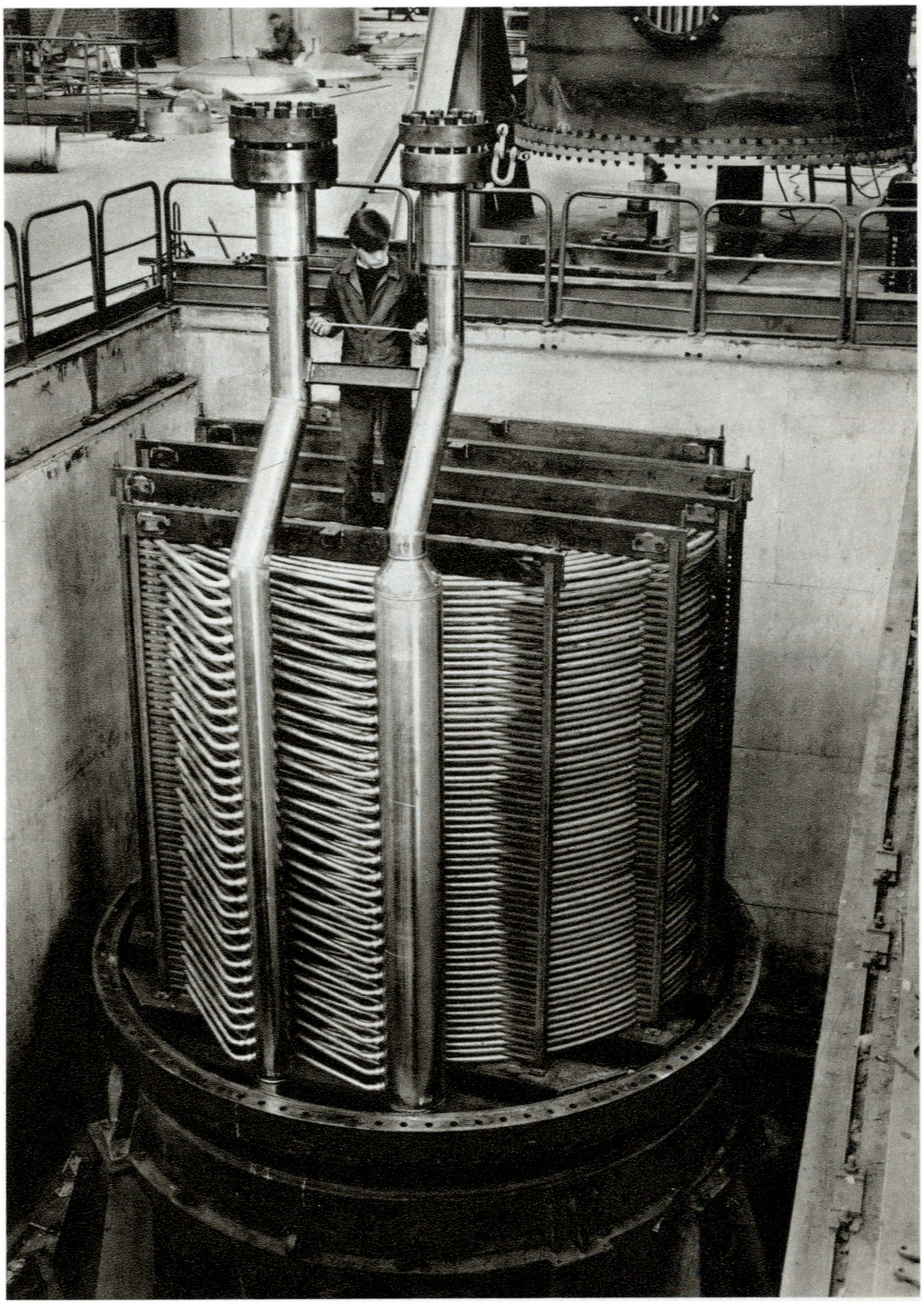


COURBES DE TRACTION D'ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES ET MARTENSITIQUES

Les limites d'élasticité données dans les notices relatives à ces aciers sont mesurées directement sur la courbe de traction, en déterminant le point de la courbe où l'allongement cesse d'être proportionnel à l'effort.

Leur limite d'élasticité est donc une caractéristique parfaitement définie et facilement mesurable.

Cette caractéristique est très importante en pratique car, dans la grande majorité des applications de ces aciers, les dimensions sont calculées de façon que les contraintes en service ne sortent jamais du domaine élastique. Ainsi, on est certain que les pièces reviendront à leurs dimensions initiales après suppression des efforts. Par ailleurs, le dépassement de la limite d'élasticité peut être dangereux pour ces aciers si elle est assez proche de la charge de rupture ou si leur courbe de traction comporte un domaine d'instabilité AB dans lequel l'allongement cesse d'être une fonction croissante de l'effort.



CONDENSEUR A CARBAMATE
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

c) **Aciers austénitiques**

Les aciers inoxydables austénitiques présentent un comportement mécanique différent dont les principaux aspects sont rappelés ci-après.

— *Limite conventionnelle*

Il existe des métaux pour lesquels cette méthode est inapplicable, soit parce que la transition entre le domaine élastique et le domaine plastique est très progressive, soit parce que le domaine élastique proprement dit n'existe pas. C'est en particulier le cas des aciers inoxydables austénitiques **à l'état hypertrempé, sans aucune conformation ou préparation préalable.**

La figure ci-après représente la courbe de traction d'un acier inoxydable austénitique à bas carbone hypertrempé à 1.050 °C.

— La courbe de traction ne présente aucune discontinuité : elle est constamment croissante jusqu'à la charge de rupture R.

— Au cours de la première mise en charge suivant le traitement d'hypertrempe, la courbe de traction n'a pas de partie rectiligne et le métal n'a pas de comportement élastique réversible : toute charge P appliquée, puis supprimée laisse à l'éprouvette un allongement rémanent Ap.

L'usage s'est établi de chercher à créer une analogie avec le comportement mécanique des aciers ferritiques et, faute de mieux, on a défini des limites conventionnelles, destinées à remplacer, dans les calculs, la limite élastique vraie. La limite conventionnelle E_x est, par définition, l'effort unitaire qui provoque, dans l'éprouvette, une déformation rémanente de x %, après décharge. Dans un très grand nombre de cas, on choisit la valeur 0,2, mais toute autre valeur est parfaitement valable et certains textes ont pris en considération la valeur 1 %, par exemple la norme allemande DIN 17440 (édition de 1967). Il faut bien se souvenir que la valeur de x, quelle qu'elle soit, résulte d'une convention et ne correspond à aucune réalité physique tangible, dans le comportement du métal en charge.

Les limites $E_{0,2}$ données dans les notices relatives aux aciers inoxydables austénitiques sont mesurées par l'une ou l'autre des deux méthodes suivantes :

a) L'éprouvette est soumise à des efforts unitaires croissants P_1 ..... P_n et déchargée après l'application de chacun de ces efforts pour pouvoir noter les allongements rémanents correspondants A_1 .... A_n pris par l'éprouvette. Lorsque A_n est supérieur ou égal à 0,2 %, on calcule la valeur de $E_{0,2}$ par interpolation entre les valeurs d'indices $(_{n-1})$ et $(_n)$.

b) La courbe effort/allongement est tracée directement à l'aide d'un extensomètre à grande amplification. Lorsque l'on pense avoir atteint un effort unitaire légèrement supérieur à $E_{0,2}$, on fait cesser l'effort. L'éprouvette conserve un allongement rémanent A légèrement supérieur à 0,2 %. On trace par le point 0,2 % la parallèle à la droite joignant A à C, qui coupe la courbe de traction en un point qui définit $E_{0,2}$.

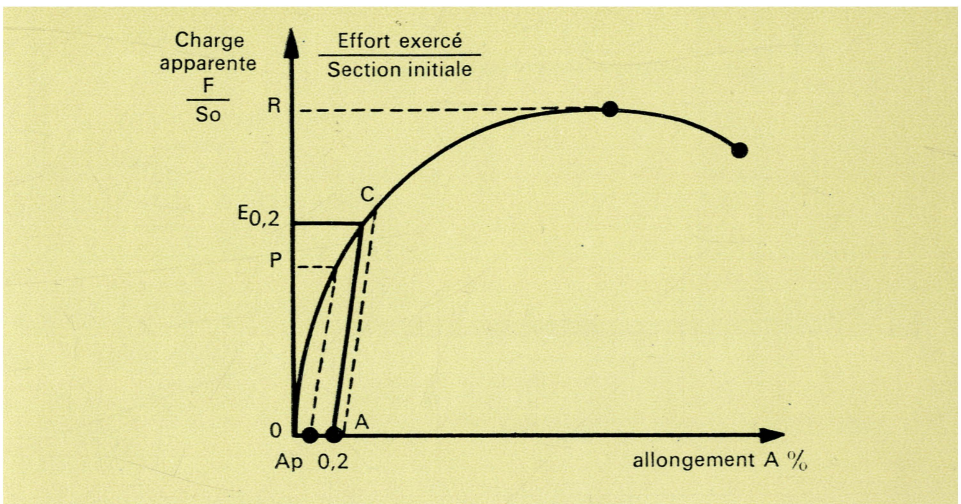
Lorsque A est inférieur à 0,2 %, il suffit d'appliquer à la même éprouvette un effort unitaire supérieur à P. Ces deux méthodes donnent des résultats identiques, mais la seconde est généralement plus rapide.

Dans l'application de ces deux méthodes aux aciers inoxydables austénitiques, l'éprouvette est déchargée rapidement dès que l'effort unitaire choisi est atteint. L'expérience montre en effet que le fait de maintenir l'effort pendant un temps notable avant déchargement conduit pour ces aciers à une importante dispersion des résultats.

Le rapport charge de rupture/limite $E_{0,2}$ et l'allongement de rupture de ces aciers sont beaucoup plus élevés que les valeurs correspondantes des aciers ordinaires ou inoxydables non austénitiques. Ces particularités sont dues à la structure austénitique et à la remarquable aptitude à la consolidation qui est une caractéristique des austénites; ceci leur confère une très grande capacité d'adaptation à la charge appliquée.

Il résulte de ce qui précède qu'il n'y a pas de danger de rupture à dépasser sensiblement la limite $E_{0,2}$ de ces aciers. Contrairement à la limite élastique des aciers martensitiques ou ferritiques, la limite conventionnelle des aciers austénitiques n'a pas de signification physique : son choix résulte essentiellement du désir de limiter à une valeur très faible la déformation d'une construction lors de la première mise en service.

Dans les notices UGINE des différentes nuances, les chiffres $E_{0,2}$ des barres et tôles sont les valeurs minimales relatives aux produits laminés à chaud, pris à l'état adouci.



COURBE DE TRACTION D'UN ACIER INOXYDABLE AUSTÉNITIQUE A BAS CARBONE HYPERTREMPÉ A 1.050 °C

RÉSERVOIR DE STOCKAGE DE MONOMÈRES ACRYLIQUES
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

— *Influence de l'écrouissage*

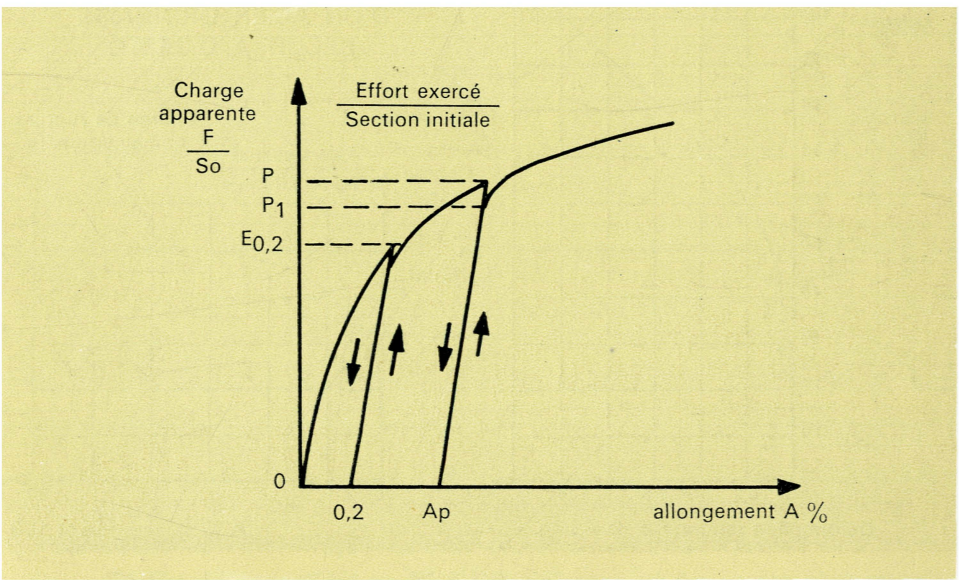
Un écrouissage préalable des aciers inoxydables austénitiques modifie notablement leur comportement, et ceci peut être mis en évidence de la façon suivante (figure ci-après).

Lorsque l'on arrête un essai de traction sur une éprouvette parfaitement hypertrempée à la charge P, et que l'on supprime l'effort, on constate, si on recommence l'essai, que le métal a acquis un comportement élastique pour toutes les charges inférieures à une valeur P_1, à peu près égale à 0,90 P.

Il est évident que ce résultat est valable quelle que soit la valeur de P, inférieure ou supérieure à $E_{0,2}$. Cela résulte de la nature conventionnelle de $E_{0,2}$. En particulier, un récipient peut être calculé pour une tension en service inférieure à $E_{0,2}$, alors que les conditions d'épreuve conduisent à des tensions supérieures à $E_{0,2}$. Cela est sans importance. L'épreuve aura eu pour effet de faire acquérir à l'appareil un domaine élastique vrai, qu'il conservera pendant toute la durée de son service.

On notera encore qu'un écrouissage préalable, effectué par le producteur lui même, conduit à un résultat analogue.

L'hypertrempe, sans régénérer complètement le métal, fait disparaître les effets mécaniques de l'écrouissage. C'est pourquoi il faut s'interdire tout traitement thermique sur des éprouvettes destinées à un contrôle de réception ou de fabrication.



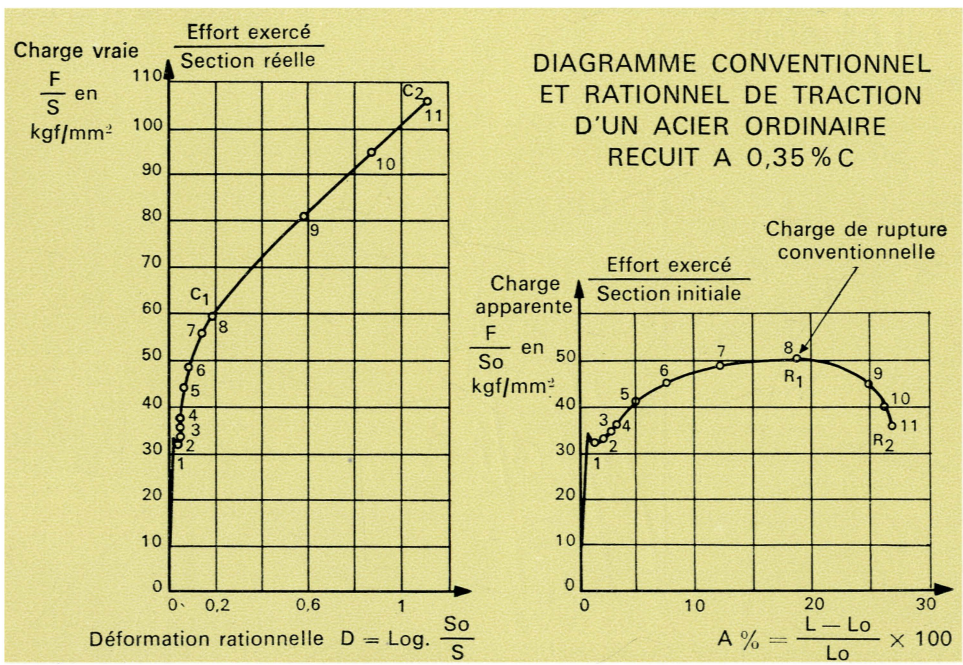
COURBE DE TRACTION AVEC SUPPRESSION D'EFFORT

2 - COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES

a) **Diagramme rationnel de traction**

Les méthodes de calcul de la résistance des matériaux reposent sur des hypothèses de base qui constituent le prologue de la théorie générale de l'élasticité. Ces méthodes donnent toute satisfaction sur le plan de la sécurité pour les aciers ferritiques. Qu'un matériau nouveau comme l'acier inoxydable austénitique ne vérifie pas exactement ces hypothèses pose la question de savoir comment procéder pour allier l'économie et la sécurité. En fait il ne s'agit pas tellement de modifier les méthodes de calcul mais de donner aux symboles leurs valeurs pratiques réelles.

Dans les aciers ferritiques, on ne considère que le domaine élastique. Par contre, avec les aciers austénitiques, les contraintes admises, généralement voisines de la limite conventionnelle, sont beaucoup plus éloignées de la charge de rupture; ils se caractérisent de plus par leur aptitude à la consolidation, facteur d'accommodation, donc de sécurité, en cas de déformation accidentelle, et du fait de leurs résiliences élevées, ils ne présentent pas de rupture fragile.



COURBE RATIONNELLE DE TRACTION

COURBE CONVENTIONNELLE DE TRACTION

Cette grande ductilité fausse en partie les enseignements que l'on tire du diagramme conventionnel de traction. Il est plus intéressant de comparer les courbes rationnelles de traction où l'on porte en ordonnée la charge vraie supportée par l'éprouvette (c'est-à-dire la contrainte = charge totale/section de l'éprouvette) en fonction de la déformation rationnelle mise en abscisse :

$$D = \text{Log } \frac{So}{S}$$

(So = section initiale de l'éprouvette, S = section de l'éprouvette sous la charge considérée, donc variable avec elle).

Cette représentation est indépendante de la géométrie de l'éprouvette et on constate que la courbe de compression est très souvent superposable à la courbe de traction dans le cas des matériaux ductiles. Enfin, l'aire sous-tendue par la courbe rationnelle représente le travail que les forces extérieures doivent fournir à l'unité de volume du métal pour obtenir une déformation donnée.

A titre d'exemple, la figure ci-contre donne la comparaison des courbes conventionnelles et rationnelles d'un acier ordinaire à 0,35% C recuit, où sont repérés les points homologues et placées les valeurs caractéristiques suivantes :

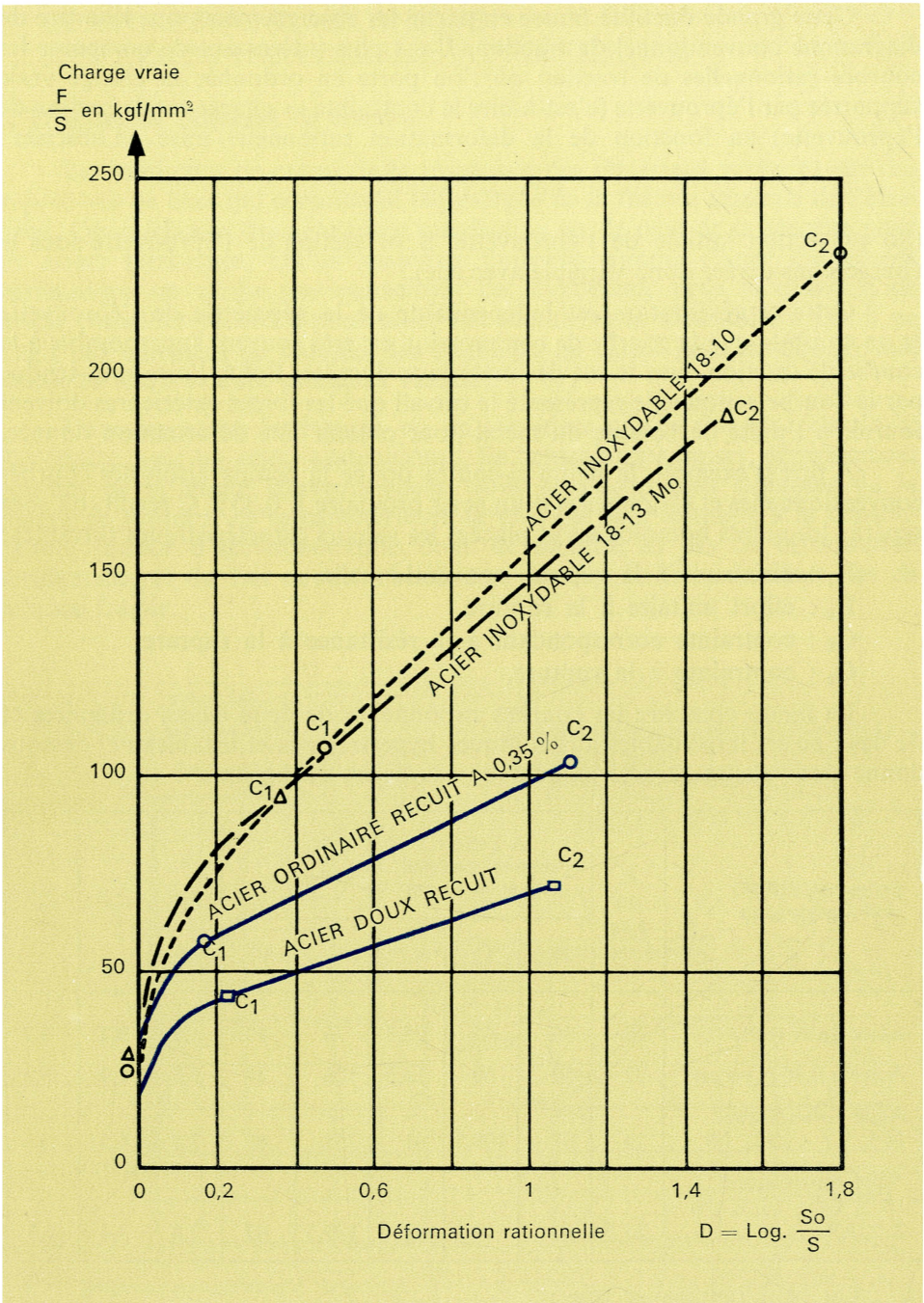
R_1 : résistance à la rupture conventionnelle,
R_2 : effort unitaire à la rupture,
C_1 : contrainte correspondant à la résistance à la rupture,
C_2 : contrainte à la rupture.

La figure compare les courbes rationnelles de deux aciers ordinaires et de deux aciers inoxydables austénitiques hypertrempés et le tableau ci-dessous donne des valeurs caractéristiques de ces aciers en kgf/mm² :

ACIERS en kgf/mm²	E ou $E_{0,2}$	A l'effort unitaire maximal (avant striction)			A la rupture		$\frac{R_1}{E}$	$\frac{C_1}{E}$	$\frac{C_2}{E}$
		R_1	C_1	A_1 %	C_2	A %			
Acier doux recuit.....	20	36	45	25,5	74	30	1,8	3,2	3,7
Acier à 0,35 % recuit..	32	50	60	18,5	106	27	1,5	1,9	3,3
Acier austénitique : 18% Cr - 10% Ni...	24	67	108,3	61	232	65	2,8	4,5	9,6
Acier austénitique : 18 % Cr - 13 % Ni - 2 % Mo.....	28	66	94	43	189,5	47	2,4	3,4	6,8

On peut remarquer que :

— L'effet de consolidation lié à l'écrouissage est beaucoup plus marqué avec les inoxydables austénitiques que dans le cas des aciers ordinaires. Notons



COURBES RATIONNELLES DE TRACTION
D'ACIERS ORDINAIRES ET D'ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES

que cette consolidation est encore plus importante avec les austénites instables à 17 % Cr - 7 % Ni qui se transforment en martensite d'écrouissage.

— Les rapports de la résistance à la déformation (point C_1) ou de la charge de rupture vraie (point C_2) à la limite élastique (ou à $E_{0,2}$) sont d'environ 2 à 3 fois plus élevés que ceux des aciers ordinaires.

— De même l'allongement uniformément réparti avant striction (A_1 %) est beaucoup plus important dans les austénitiques.

Les aciers inoxydables austénitiques ont un pouvoir de consolidation par écrouissage considérablement plus grand que celui des aciers ordinaires (ou peu alliés), associé à une ductilité avant striction beaucoup plus importante.

Ainsi le travail que doivent fournir les forces extérieures pour provoquer une déformation donnée au métal (par exemple le travail que doit fournir la pression intérieure pour déformer un récipient) est plus élevé dans le cas des aciers austénitiques que dans le cas des aciers ordinaires.

Tout ceci peut se résumer en disant que les aciers inoxydables austénitiques ont une capacité d'adaptation à l'effort appliqué supérieure à celle des aciers ordinaires.

L'utilisation pratique des aciers inoxydables austénitiques ne saurait donc logiquement être basée que sur des considérations liées à la résistance à la rupture. De plus, compte tenu de leur exceptionnelle capacité d'adaptation et de la valeur élevée de l'énergie de rupture, il peut paraître normal d'adopter, à leur égard, un coefficient de sécurité inférieur ou au plus égal à celui déjà retenu pour les aciers au carbone.

b) **Effet d'une précontrainte**

Nous appellerons précontrainte une sollicitation préalable exercée dans le même sens que les efforts supportés par le métal en service. C'est un cas particulier de l'influence de l'écrouissage.

Du point de vue pratique, cela peut correspondre à **l'épreuve** avant la mise en service d'un récipient à pression.

On a vu qu'expérimentalement les courbes de remontée en charge d'un acier austénitique hypertrempé après application d'une précontrainte sont pratiquement des droites parallèles et que l'enveloppe des courbes obtenues de cette façon est superposable à la courbe que l'on aurait tracée sans décharge intermédiaire.

On constate également que la précontrainte de traction entraîne l'apparition, au cours d'un essai de traction ultérieur, d'un domaine d'efforts allant au moins jusqu'à 90 % de la précontrainte, dans lequel les déformations sont pratiquement proportionnelles aux efforts, l'éprouvette revenant à sa dimension initiale quand on supprime la charge.

Il s'agit donc d'un domaine à comportement élastique dont l'étendue ne dépend pratiquement que de la précontrainte (ou de la déformation plastique résultante), et qui est en particulier totalement indépendante de la position de celle-ci par rapport à $E_{0,2}$.

Si l'on revient maintenant au cas d'un récipient à pression, on voit que l'épreuve place le métal dans un domaine d'élasticité acquise pourvu que la pression de service ne dépasse pas 90 % de la pression d'épreuve, quelle que soit cette dernière.

Dans ce sens, **le métal n'a acquis ses propriétés de service qu'après l'épreuve qui pourrait être considérée de ce fait comme la dernière opération de fabrication du récipient** qui détermine le comportement mécanique ultérieur.

Il faut préciser qu'en toute logique un essai de traction sur métal hypertrempé ne peut permettre de connaître les propriétés du métal en service que si l'éprouvette a subi avant l'essai une précontrainte correspondant à la pression d'épreuve.

c) Utilisation pratique

Pour les utilisateurs, les aciers inoxydables austénitiques se caractérisent donc par :

— une grande capacité de déformation avant rupture,

— l'aptitude au durcissement par déformation plastique (capacité d'adaptation à l'effort appliqué) et l'absence de vieillissement après écrouissage,

— le fait que le travail des forces extérieures pour obtenir une déformation donnée est plus grand que dans le cas des aciers ordinaires,

— l'absence de sensibilité à l'entaille à toutes températures.

La prise en considération de $E_{0,2}$ comme critère de choix du taux de travail a pour seul effet de limiter à une valeur voisine de 0,2 % la déformation à l'épreuve d'un récipient chaudronné.

Dans un grand nombre d'applications, une déformation supérieure à 0,2 % n'est pas gênante, et les propriétés particulières de ces aciers, notamment le fait que les propriétés du métal en service sont principalement déterminées par la précontrainte qu'il a subie, sont telles qu'il est plus logique de baser, en chaudronnerie, le calcul de leur taux de travail sur des considérations de déformation maximale admissible à l'épreuve.

La quatrième partie, consacrée à la conception des appareils, traitera de l'application pratique de cette importante question.

GRIGNARD DE 5.000 LITRES
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

3 - VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES AVEC LA TEMPÉRATURE

Il est important, pour certaines applications, de connaître l'évolution des caractéristiques mécaniques des principaux aciers inoxydables avec la température.

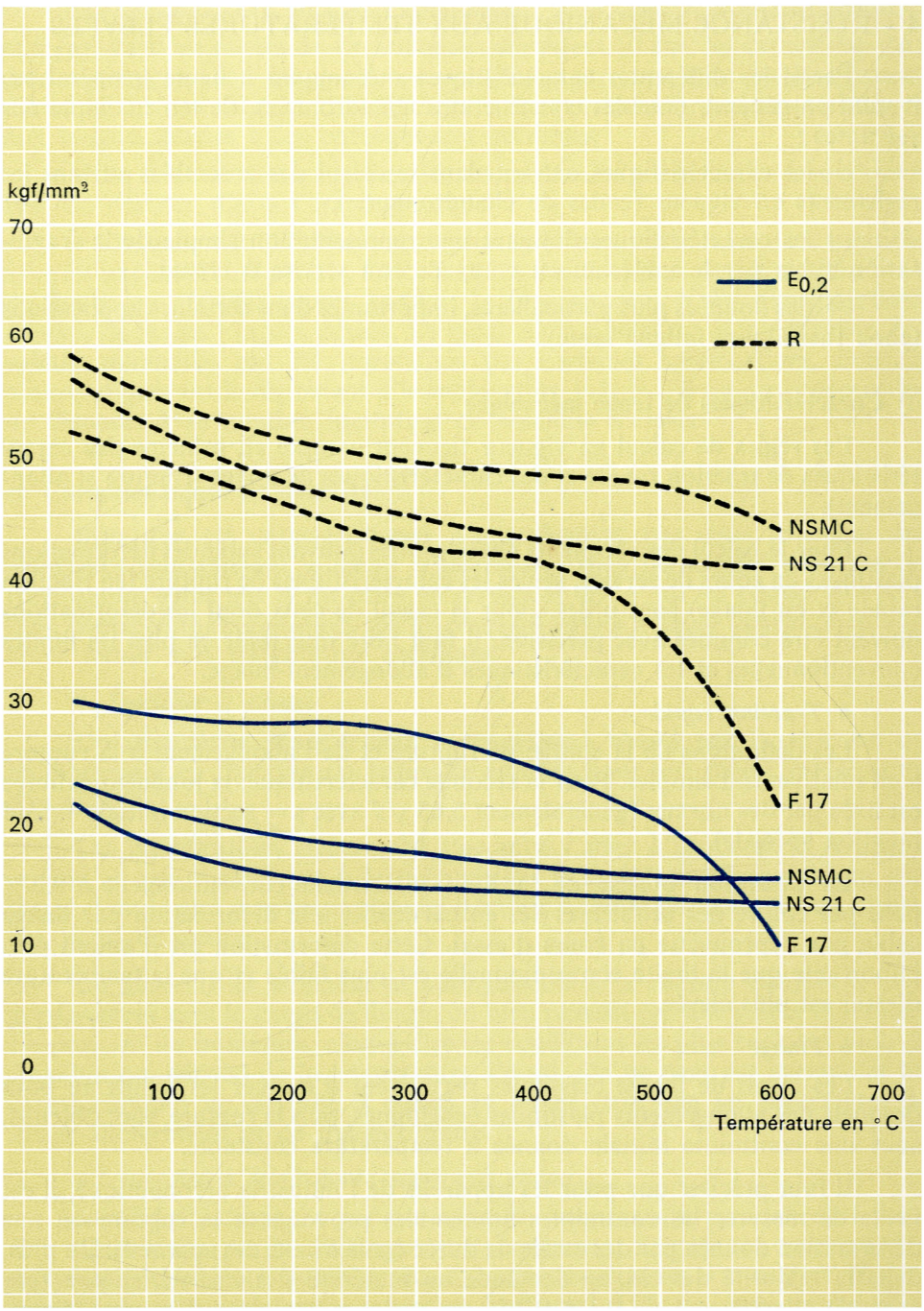
Le tableau ci-dessous donne des **valeurs moyennes**, obtenues sur des barres, de la limite d'élasticité vraie ou de la limite à 0,2 %, ainsi que de la charge de rupture conventionnelle à des températures supérieures à l'ambiante.

Ces caractéristiques instantanées sont celles mesurées par essais de traction classiques donc à vitesse rapide, aux températures indiquées. Elles ne sont donc pas représentatives de la tenue en service d'un appareil fonctionnant en permanence à des températures élevées mais peuvent servir de guide en ce qui concerne la mise en œuvre du matériau à ces mêmes températures. Les lois de décroissance en fonction de la température sont analogues dans le cas des tôles.

Ces caractéristiques diffèrent des caractéristiques de fluage-rupture et de fluage-allongement définies précédemment et dont les modalités de détermination vont être précisées plus loin.

Nuances UGINE	kgf/mm²	20°	100°	200°	300°	400°	500°	600°
F 17.....	E	31	29,5	29	28	25	21	10,5
	R	53	50	46,8	43,6	42,4	36,8	22,2
NS 22 S.....	$E_{0,2}$	19,5	15,8	13,8	12,5	11,7	11,3	10,9
	R	55	48	43	41	39,5	38	32,5
NS 21 A.....	$E_{0,2}$	22,5	18,2	15,2	14,1	13,4	12,5	11,5
NS 21 AS ...	R	60	53,5	47	45,5	44,5	43,5	38
NS 21 S.....	$E_{0,2}$	22,5	18,4	16,5	15,5	15	14,7	13,9
NS 21 C.....	R	57	52,5	48,5	46	44,5	42,8	41,5
NSM 21 S...	$E_{0,2}$	21	18,1	16,1	14,1	12,6	11,3	10,4
NSM 22 S...	R	55	50	46	43,5	42,7	42	36,6
NSM 21	$E_{0,2}$	24	21	18,4	16,8	15,7	14,6	13,9
	R	58	52,5	47,5	47	46,5	46	42,5
NSMC.....	$E_{0,2}$	24	22	20	18,5	17,3	16,8	16,3
	R	59	55,5	52	50,5	49,5	48,5	45

Le graphique ci-contre illustre l'évolution en fonction de la température des caractéristiques instantanées pour les trois nuances UGINE F 17, NS 21 A, NSMC et montre le comportement différent des deux familles d'aciers inoxydables.



ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES MESURÉES PAR ESSAI DE TRACTION CLASSIQUE DE DIFFÉRENTS ACIERS INOXYDABLES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

4 - RÉSISTANCE MÉCANIQUE AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Parmi les différentes caractéristiques mécaniques à haute température, il suffit en général, pour les constructions chaudronnées, de tenir compte des suivantes :

— les caractéristiques entrant dans le calcul des ensembles suivant les règlements en vigueur (codes de chaudronnerie),

— les caractéristiques donnant une représentation simple de la fragilisation subie par le matériau au cours de son service à chaud,

— des données plus particulières, importantes dans certaines applications (choc thermique, fatigue lente).

a) **Caractéristiques de tenue mécanique**

Les règles de calcul en vigueur tiennent compte en principe des caractéristiques de traction rapide et des caractéristiques de fluage (rupture et allongement).

Pour le calcul des récipients chaudronnés pouvant subir des déformations plastiques en cours de service, seules les caractéristiques de rupture (en traction rapide et en fluage) sont utiles. Pour le calcul de ceux dont les déformations doivent être connues avec précision, il faut faire intervenir en plus les limites conventionnelles et les caractéristiques d'allongement-fluage.

• *Traction rapide*

Les définitions de la charge de rupture et de l'allongement à la rupture sont relativement simples. Pour la seconde caractéristique, la longueur calibrée est fixée par des normes (généralement $5{,}65\sqrt{s}$ avec s = section initiale — sauf mention spéciale).

La définition précise de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % pose par contre des problèmes liés en particulier à la déformation par fluage subie par l'éprouvette en cours d'essai. Cette déformation est d'autant plus importante que la limite conventionnelle est plus faible et que la température d'essai est plus élevée.

• *Fluage*

Les essais de fluage classiques permettent d'évaluer les temps au bout desquels des allongements plastiques échelonnés, puis la rupture, sont obtenus, sous une contrainte initiale donnée à température constante.

Il faut préciser que pour les appareils de l'industrie aéronautique, il est facile de mesurer les contraintes admissibles provoquant la rupture ou une déformation donnée par des essais de durée égale à celle des appareils. De plus, dans la majorité des cas, on demande au matériau des caractéristiques (par exemple allongement de 0,1 à 0,2 % en quelques centaines d'heures) correspondant à des périodes de fonctionnement « de pointe » qui ne représentent qu'une très faible partie de la vie de l'appareil.

Pour les appareils terrestres (chaudières, surchauffeurs, turbines à vapeur et à gaz) dont les durées de vie attendues dépassent 10 ans, les caractéristiques de fluage-rupture et fluage-allongement des matériaux sont habituellement évaluées pour une durée de 100.000 heures. La recherche de ces caractéristiques aux longues durées a les conséquences suivantes :

- Le désir de connaître des valeurs minimales garanties impose d'effectuer un nombre d'essais très important.
- Un temps de 100.000 heures (plus de 11 ans) est souvent incompatible avec les impératifs industriels. De ce fait, le souci de définir des caractéristiques de fluage en 100.000 heures conduit le plus souvent à des extrapolations d'essais de moins longues durées. Le mode d'extrapolation et la définition des valeurs minimales ont été normalisés par certaines spécifications, dont la plus appliquée est le règlement d'homologation E.D.F. : il est alors nécessaire de disposer d'un nombre important de résultats d'essais.

b) **Caractéristiques de ductilité**

Bien que ces caractéristiques n'interviennent pas dans le calcul des ensembles fonctionnant à haute température, elles permettent d'évaluer la fragilisation subie par le maintien en service et de ce fait les risques que peut faire courir cette fragilisation, soit au cours du service à haute température, soit après retour à la température ambiante.

- *Ductilité à chaud*

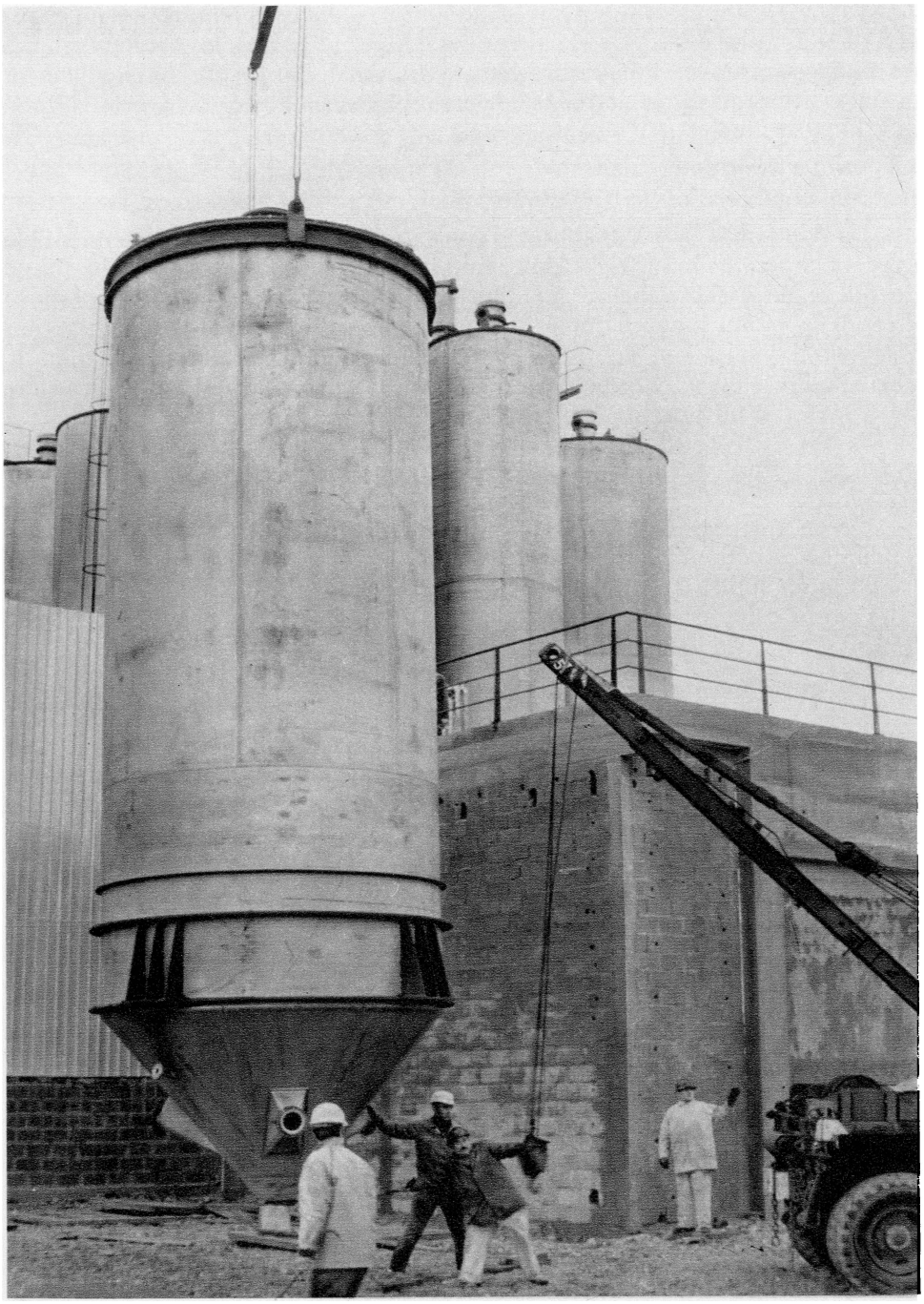
On caractérise généralement la ductilité à chaud par la striction ou l'allongement en fonction du temps de rupture pour une même température d'essai.

Les modifications structurales que subit l'acier à partir de sa structure initiale, et qui contribuent à le faire résister à la déformation plastique par fluage, font le plus souvent évoluer sa ductilité à chaud par leur effet au niveau des joints de grains.

En général, les strictions et allongements à la rupture diminuent progressivement avec le temps de fluage, ou bien passent par une valeur minimale. La position du minimum, c'est-à-dire les conditions les plus critiques pour la fragilisation, dépend de la température d'essai. On ne peut pas extrapoler les caractéristiques de ductilité à chaud au même titre que les contraintes de fluage-allongement et de fluage-rupture.

- *Ductilité à froid après service à chaud*

Les fragilisations en service à haute température peuvent également être caractérisées par la résilience ou l'allongement de rupture en traction à température ambiante, après service à haute température. On mesure généralement ces propriétés après maintien isotherme à haute température sans contrainte. Ces essais représentent correctement la fragilisation des aciers réfractaires classiques.



RÉSERVOIR DE STOCKAGE DE POLYÉTHYLÈNE
ACIER 18-10 (NS 20 P)

En effet, les alliages à 25 % de chrome et 20 % de nickel, après un temps prolongé d'utilisation entre 650 et 850 °C, deviennent fragiles donc cassants à froid. Cette fragilité est due à l'apparition de la phase sigma (dure et fragile). De tels essais représentent également de façon convenable la fragilisation d'alliages réfractaires plus complexes par précipitation d'autres phases intermétalliques.

Dans le cas où le développement de la fragilisation dépend de la contrainte de fluage appliquée en service, on a recours aux mêmes essais mais sur éprouvettes de résilience ou de traction prélevées dans des éprouvettes ayant été maintenues en fluage sous charge à température élevée. Ces essais sont surtout pratiqués sur les aciers à 12 % de chrome dans leurs applications en boulonnerie et pièces mobiles de turbines.

c) **Résistance aux sollicitations alternées**

On n'a longtemps tenu compte de ce problème qu'en affectant les calculs classiques d'un certain coefficient de sécurité. La nécessité de pousser les calculs avec plus de précision conduit de plus en plus à connaître le comportement des matériaux sous des sollicitations alternées :

— Sous l'action de cycles lents et répétés de contraintes, les matériaux se détériorent par l'accumulation des déformations plastiques subies à chaque cycle. Les caractéristiques classiques de traction et fluage ne suffisent pas à représenter la tenue des matériaux dans ces conditions et on fait appel à des essais de fatigue lente (ou de fluage dynamique).

L'endurance augmente à la fois avec la limite conventionnelle et la ductilité, mais la ductilité est prépondérante aux amplitudes de contrainte élevées, la limite élastique aux amplitudes modérées. La recherche d'un compromis entre limite conventionnelle et ductilité conduit souvent à s'écarter des traitements thermiques classiques ou à faire appel à l'écrouissage.

— Les essais de choc thermique étudient l'effet des variations rapides de températures dans un métal bridé par un entourage plus froid : il se produit une succession de fluages en compression et de sollicitations en traction, qui conduisent à la rupture avec d'autant plus de rapidité que les cycles thermo-mécaniques subis provoquent une fragilisation plus importante du métal et que l'effet d'entaille est plus grand.

L'oxydation superficielle intervient également pour créer à haute température des amorces de fissuration et contribuer à leur propagation. Les essais de choc thermique les plus intéressants sont ceux dans lesquels le bridage imposé à l'éprouvette par son montage peut être défini numériquement.

d) **Rupture à temps**

Les figures ci-après donnent un exemple de courbes de rupture à temps sur des nuances classiques d'UGINE.

La première série de courbes donne les contraintes provoquant la rupture en 1.000 heures en fonction des températures pour des nuances austénitiques pouvant être utilisées par exemple dans l'industrie aéronautique :

NS 190
FLUGIVAC 130
FLUGIVAC 718
FLUGIVAC C 35
FLUGINOX 150
FLUGINOX N 25

La deuxième série de courbes donne les contraintes provoquant la rupture en 100.000 heures en fonction des températures, pour des nuances destinées à des appareils à longue durée de vie pouvant être utilisées en chaudronnerie :

a) acier au carbone A 42

b) nuances ferritiques :

KMV1
KM 30
FLUGINOX 65

c) nuances austénitiques :

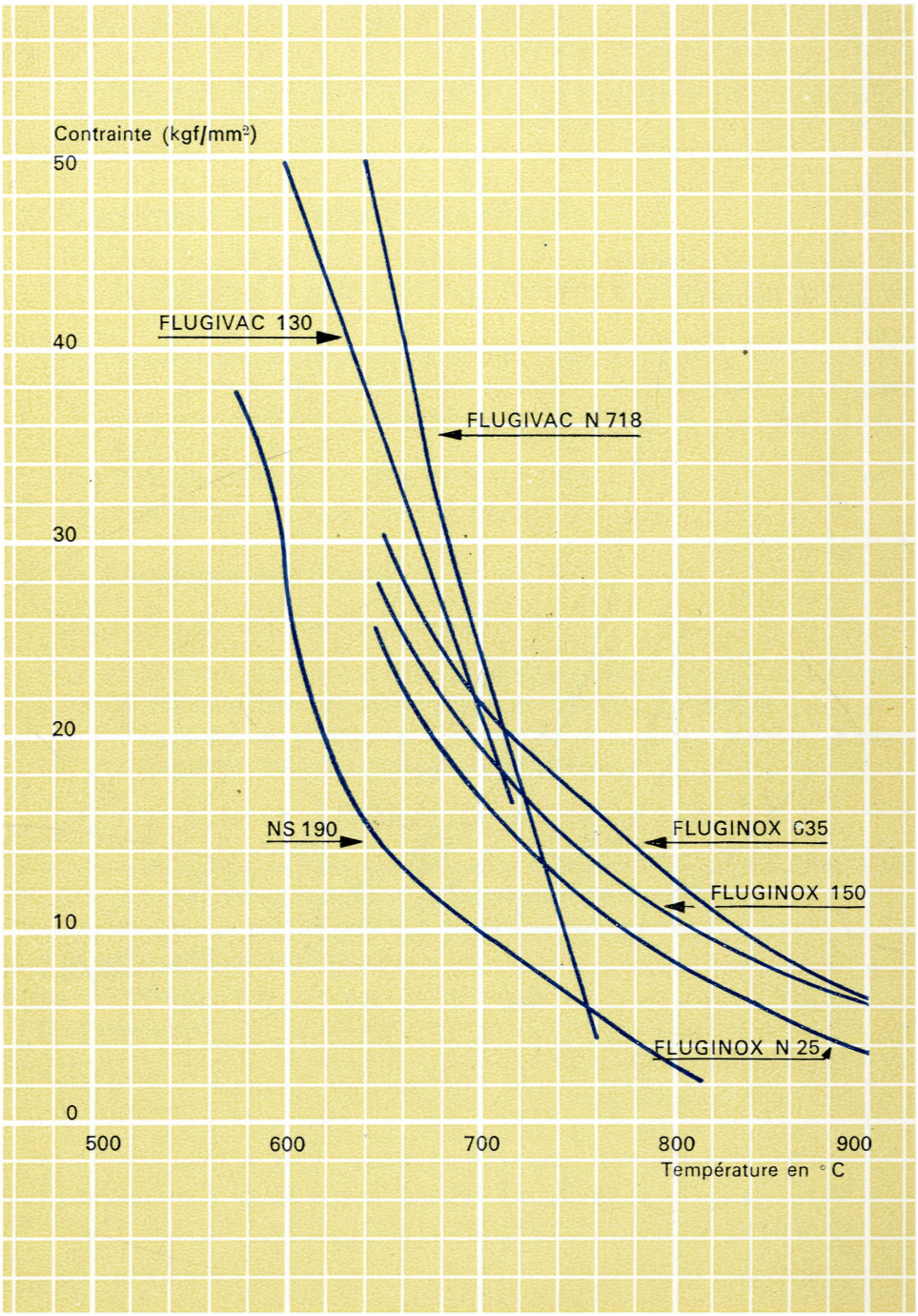
NS 21 C
NSMC
NS 190
NS 30

Le Centre de Recherches Métallurgiques d'UGINE, qui a effectué ces essais, est donc à même de faire bénéficier les constructeurs de son expérience.

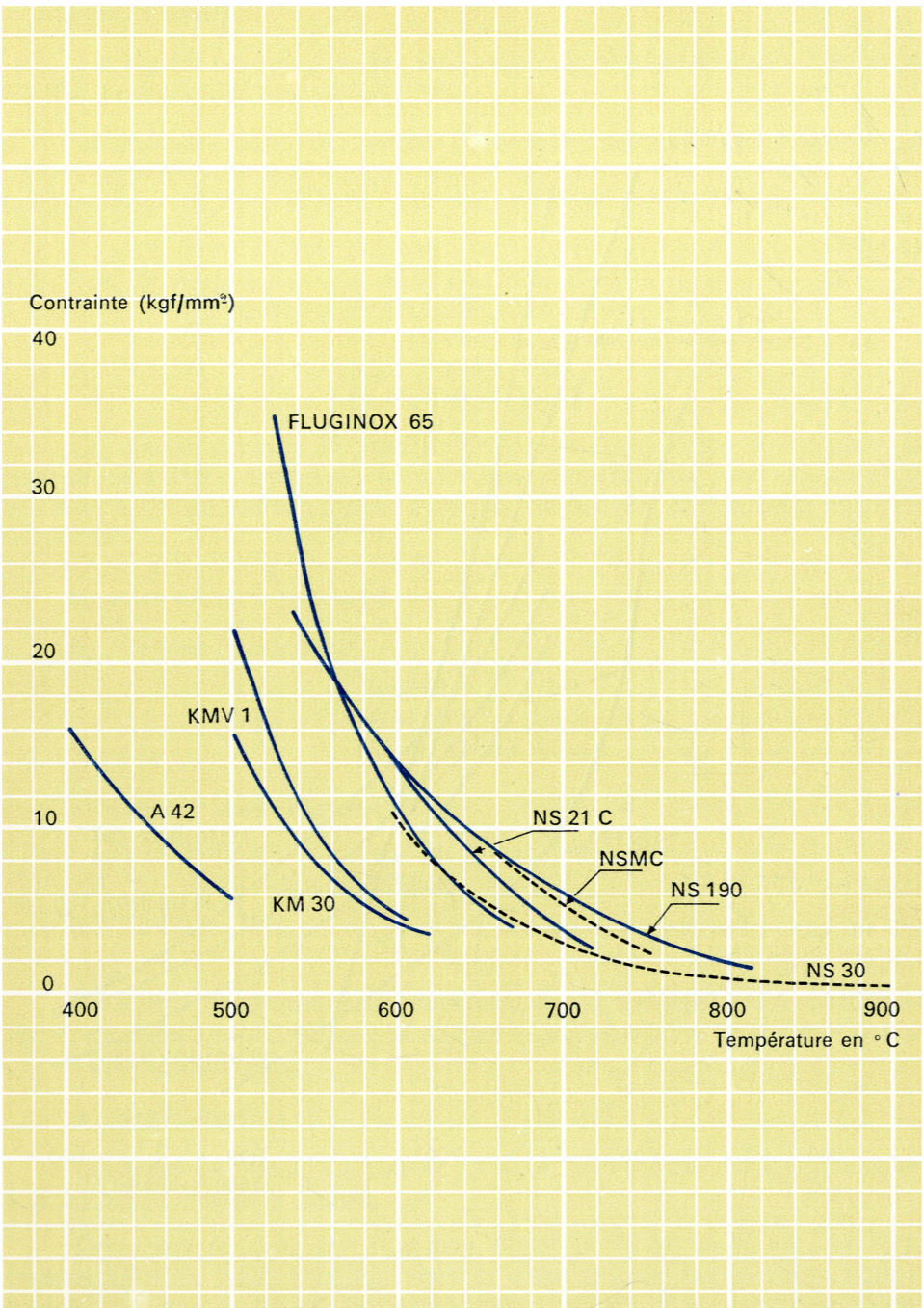
• *Fragilisation*

Les aciers du type 25/20 (nuance UGINE NS 30) subissent la fragilisation à froid après emploi à chaud.

Les aciers du type 23/12 (nuance UGINE NS 24) et du type 18/12 Si (nuance UGINE NSZ) sont également le siège de cette précipitation, mais la fragilité qui en résulte est beaucoup moins grande. Leur emploi est donc parfaitement possible dans la zone de température étroite où le NS 30 ne peut convenir.



COURBE DE RUPTURE A TEMPS EN 1.000 HEURES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE



COURBE DE RUPTURE A TEMPS EN 100.000 HEURES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

CONCLUSION

Il résulte de toutes les considérations qui viennent d'être évoquées que les aciers inoxydables possèdent, pour l'utilisation en chaudronnerie, un certain nombre de qualités qui peuvent être ainsi énumérées :

1°) Comportement vis-à-vis des milieux ambiants

— A la base, et c'est leur raison d'être, résistance à la corrosion aux températures normales, d'où conservation et allégement de la construction.
— En général, aptitude au polissage, renforçant cette résistance.
— Non pollution des matières et non coloration des produits en contact.
— Propreté (aptitude aux nettoyages énergiques et aux décontaminations).
— Entretien facilité et d'un moindre coût.
— Résistance aux corrosions à chaud.

2°) Caractéristiques pour l'emploi

a) *Pour tous les aciers inoxydables*

— Propriétés mécaniques à la température ambiante (rapport résistance-poids conférant un allégement par rapport aux aciers doux).
— Résistance au fluage et à l'oxydation à chaud (particulièrement importante pour les aciers austénitiques).

b) *Pour les aciers inoxydables austénitiques seulement*

— Sécurité du fait des allongements et des chiffres de résilience élevés (facteur important pour les appareils sous pression).
— Propriétés mécaniques aux très basses températures (sécurité du fait de la haute résilience).
— Amagnétisme.

Troisième partie

TECHNOLOGIE DE LA MISE EN ŒUVRE DES ACIERS INOXYDABLES

BALLON POUR L'INDUSTRIE DE LA PAPETERIE
(REVÊTEMENT EXTÉRIEUR EN TOLES A SURFACE TRAVAILLÉE TST 10 EN F 17)

Chapitre XI

GÉNÉRALITÉS SUR LA TECHNOLOGIE

1 - MATIÈRES UTILISÉES ET ÉTATS DE SURFACE

Les aciers inoxydables sont élaborés sous forme de tôles,.bandes, plats, laminés divers, barres, fils, tubes, pièces moulées et forgées.

Pour le chaudronnier, les matières premières dont il a besoin sont les suivantes :

— Tôles laminées à chaud ou à froid.
— Flans découpés, pièces découpées dans la tôle.
— Fonds emboutis standards.
— Pièces laminées ou forgées (par exemple brides, plaques tubulaires).
— Pièces moulées (par exemple plateaux d'essoreuses).
— Tubes avec ou sans soudure.
— Métaux d'apport pour soudage.
— Boulonnerie, visserie.
— Rivets.
— Barres pour pièces annexes.

Toutes ces matières peuvent être en acier inoxydable et plus spécialement réalisées avec des aciers inoxydables austénitiques qui sont généralement livrés décapés, hypertrempés, passivés.

L'usine d'Ugine a une « Forge rapide » qui peut forger dans de courts délais des brides et des accessoires et nous pouvons étudier au préalable avec les constructeurs les pièces brutes de forge ou ébauchées par usinage dont ils auraient besoin.

Les tôles d'acier inoxydable normalement utilisées en chaudronnerie sont les tôles laminées à chaud et à froid. Dans ce dernier cas, il peut être intéressant d'approvisionner des tôles minces ayant comme présentation :

— laminé à froid adouci décapé,
— laminé à froid adouci décapé glacé,
— laminé à froid recuit brillant,
— poli à un grain compris entre 80 et 320.

Le choix entre ces divers états de surface ainsi que la nécessité éventuelle de polir les appareils en fin de fabrication sont en chaudronnerie essentiellement fonction de l'emploi envisagé ou de la présentation souhaitée par

l'utilisateur; une sélection judicieuse des états de surface des tôles influe sur le coût de leur mise en œuvre et en particulier l'utilisation des tôles polies en usine, travaillées sous protection, permet une économie de main-d'œuvre en atelier.

Il est en tout cas déconseillé pour quelque raison que ce soit de rayer profondément les surfaces ou d'y créer par montage des anfractuosités profondes susceptibles d'établir des zones d'aération différentielle, apportant des risques de corrosion.

Dans le cas particulier d'appareil en contact avec les composés du chlore, cas où existent des risques d'apparitions de piqûres, la résistance à la corrosion sera améliorée par l'état de surface et il est alors du plus grand intérêt d'utiliser des appareils dont les faces utiles sont finalement plus ou moins polies, cordons de soudure compris.

On peut dans ce but approvisionner des tôles prépolies, mises en œuvre sous protection. Quelquefois on peut être amené en fin de fabrication à meuler ou à réparer à certains endroits, puis à polir les soudures.

L'industrie chimique s'accommode le plus souvent, pour les appareils qu'elle utilise, de surfaces simplement décapées. Il n'en est pas de même des industries alimentaire, pharmaceutique et décorative dans lesquelles on préfère les surfaces polies ou très lisses à l'état de livraison; ces surfaces sont plus aisées à entretenir, se prêtent mieux à l'élimination des germes et déchets et retiennent moins l'humidité.

2 - PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES

a) **Résistance à la corrosion**

La tâche du chaudronnier est de fabriquer un appareil inoxydable. Les matières premières qu'il utilise possèdent cette propriété en l'état où elles sont livrées. Les opérations de fabrication, appliquées aux aciers inoxydables, sont alors caractérisées par des particularités propres à conserver, ou à défaut à restaurer cette résistance aux corrosions. La gamme de fabrication la plus économique sera celle qui limitera à leur minimum le nombre de ces opérations de restauration.

Pour que le travail de mise en œuvre aboutisse à de bons résultats, il faut au préalable bien connaître la nature des modifications que le métal de base peut subir.

Les modifications d'analyse sont spécifiques au soudage, qui est une opération de micrométallurgie où s'élabore, à partir du métal de base et du métal d'apport, un alliage nouveau qui devra donc posséder une analyse correcte vis-à-vis de la résistance à la corrosion que l'on recherche, ce que l'on obtiendra facilement par le choix d'un métal d'apport approprié.

Les modifications de structure peuvent résulter du soudage, lorsque les conditions d'utilisation de l'appareil sont susceptibles d'engendrer la corrosion

intercristalline : milieux acides donnant une très faible corrosion uniforme, mais présentant un pouvoir oxydant, d'ailleurs compris en d'étroites limites. On peut éviter ce type de corrosion si le métal de base est choisi à très basse teneur en carbone ou stabilisé au titane ou au niobium et si le métal d'apport est à très basse teneur en carbone.

C'est donc au niveau de la conception des appareils (voir quatrième partie) qu'il faut mettre au point cette question, par le choix de nuances d'aciers appropriées.

Les modifications de nature mécanique peuvent provenir de la conformation qui installe dans le métal des contraintes pouvant être, dans certains milieux, génératrices de corrosion sous tension (cas de water-jackets sous pression contenant des eaux chlorurées par exemple).

Il est facile de choisir dès la conception de l'appareil une nuance d'acier convenable, par exemple à teneur suffisante en molybdène.

Les modifications d'état de surface provenant des opérations de fabrication peuvent être des obstacles au jeu du mécanisme de régénération de la couche passive par libre contact de la surface avec l'air, dont résulte la résistance à la corrosion.

Les précautions à prendre sont indiquées à propos des opérations de mise en œuvre et de finition.

b) **Aptitude au formage**

Les aciers inoxydables, et principalement les aciers austénitiques, sont caractérisés par une excellente plasticité à froid. Cette propriété est due surtout à leur aptitude à la consolidation par écrouissage qui a pour effet, lors de l'emboutissage d'un fond par exemple, de consolider les zones conformées qui peuvent alors entraîner sans se rompre les zones voisines en cours de conformation.

c) **Aptitude au soudage**

Les aciers martensitiques sont délicats à souder, ce qui peut impliquer des précautions thermiques (préchauffage, refroidissement lent, traitement thermique ultérieur).

Les aciers ferritiques se soudent sans difficulté. Les cordons ferritiques sont fragiles, ainsi que les zones affectées par la chaleur ; mais l'emploi de métaux d'apport austénitiques évite la fragilité des cordons. Cependant, les tubes en F 17 soudés en radio-fréquence conservent la ductilité du métal de base.

Les aciers austénitiques sont par contre essentiellement soudables, ce qui justifie leur place prépondérante dans les constructions chaudronnées en acier inoxydable. D'une manière générale, le soudage des aciers austénitiques ne nécessite ni préchauffage, ni précautions de refroidissement, ni traitement thermique ultérieur.

En effet, ces aciers étant austénitiques à toutes températures, ne manifestent pratiquement pas de transformations métallurgiques lors du soudage.

Les propriétés mécaniques des joints sont comparables à celles des métaux de base. Les tableaux ci-dessous permettent de comparer, pour plusieurs nuances, les valeurs des **caractéristiques mécaniques en travers des joints soudés** par rapport à celles du métal de base.

SOUDAGE A L'ÉLECTRODE ENROBÉE
DE MÊME TYPE DE COMPOSITION QUE LE MÉTAL DE BASE
Ruptures dans le métal de base ou en zone affectée

Métal de base : tôles de 3 mm					Joint soudé		
		R kgf/mm²	E0,2 kgf/mm²	A %	R kgf/mm²	E0,2 kgf/mm²	A %
18-10	C = 0,025 %.	59	25	58	59,5	26	45
18-12-2 Mo	C = 0,025 %.	61,5	32	49	62	33	40
25-20	C = 0,10 %.	72,5	38	39	74	40	33

SOUDAGE EN TIG AUTOMATIQUE SANS APPORT
Ruptures dans l'axe du cordon

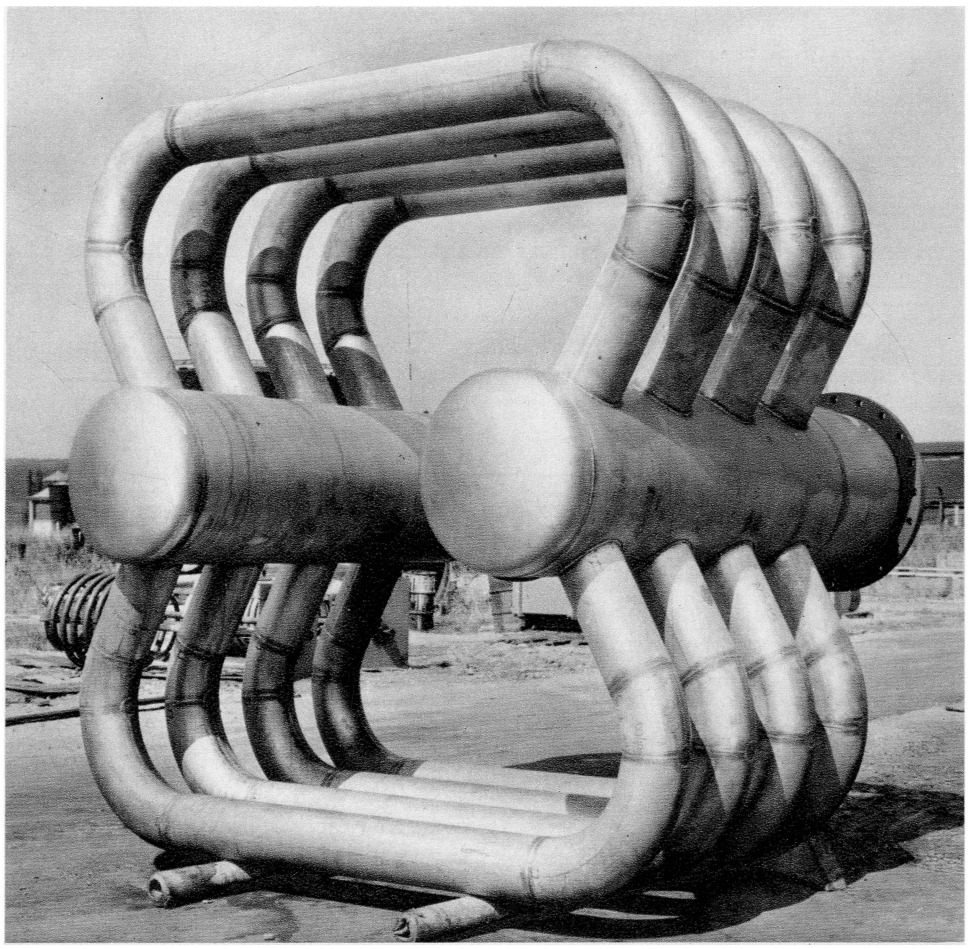
Métal de base : tôles de 2 mm					Joint soudé		
		R kgf/mm²	E0,2 kgf/mm²	A %	R kgf/mm²	E0,2 kgf/mm²	A %
18-10	C = 0,025 %.	58	28	53	59	27,5	45
18-12-2 Mo	C = 0,025 %.	61	30	48	60,5	32	33
25-20	C = 0,10 %.	71,5	43	38	71,5	41	28

Certaines nuances courantes du type 18-10 ou 18-12 au molybdène (NS 21 A - NS 22 S - NS 21 C - NSM 21 - NSM 21 S - NSM 22 S - NSMC par exemple) se soudent bien, en faibles épaisseurs, sans métaux d'apport, du fait du rôle favorable de la ferrite δ qui tend à s'opposer à la fissuration lors du refroidissement.

d) **Aptitude au polissage**

Un état de surface poli peut être recherché pour des raisons diverses : aspect, résistance accrue à la corrosion, moindre aptitude aux rétentions superficielles.

Le poli « miroir » n'est pas réalisable sur les aciers contenant du titane ou du niobium. Ces éléments forment en effet avec le carbone des inclusions très dures, qui restent en relief sur la surface et dont l'effet est de créer des figures allongées dans le sens du polissage, figures qu'on désigne souvent sous le nom de « queues de comètes ».



LYRES DE DILATATION POUR UNE INSTALLATION NITRIQUE
ACIER 18-10 (NS 95)

3 - OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

a) **Magasinage et manutentions**

Il y a toujours intérêt, dans un atelier de chaudronnerie générale, à spécialiser un local pour le magasinage des aciers inoxydables, et plus particulièrement des tôles, afin de les abriter des pollutions provenant des autres matériaux (graisses, fer, rouille, cuivre, etc.).

Les dispositions les plus recommandables dans un tel magasin sont les suivantes :

— local fermé et couvert,
— stockage vertical des tôles,
— appuis garnis de matériaux mous (bois, cuir, caoutchouc...),
— pinces de manutention et élingues garnies pareillement,
— identification claire des produits neufs et des chutes en retour de fabrication, pour éviter tout risque de mélange des nuances d'aciers inoxydables, qui ne sont pas interchangeables.

b) **Traçage et découpage**

Le *traçage* à la pointe dépose du fer sur les surfaces et il conviendra d'éviter les traits inutiles. Le traçage au crayon pourra se faire sur les tôles à revêtement de papier, avant un cisaillage. Il y a intérêt à travailler au gabarit.

Les procédés courants de *découpage* des métaux peuvent s'appliquer, en général, aux aciers inoxydables.

• *Oxycoupage*

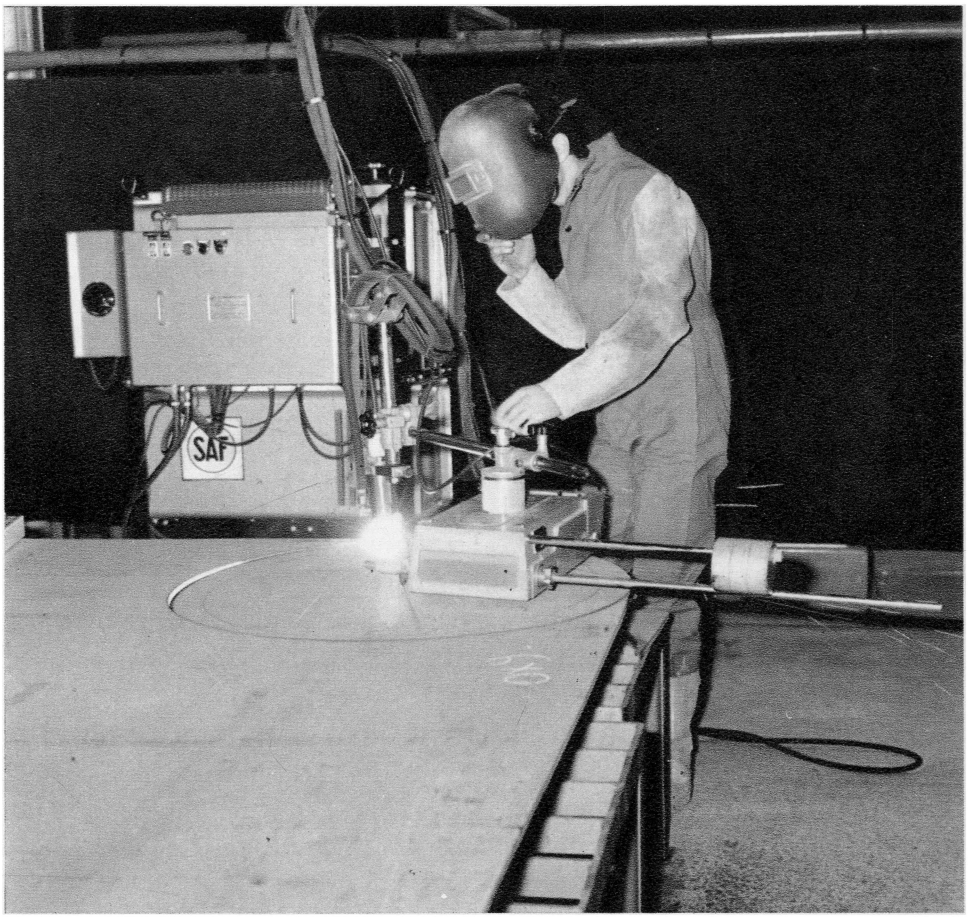
L'oxycoupage des aciers inoxydables, du fait que les oxydes de chrome sont des matériaux réfractaires, n'est possible qu'avec un appareillage spécial qui injecte de la poudre de fer dans la flamme. Ce procédé est peu recommandable. Il provoque des échauffements notables et surtout des pollutions ferreuses.

Il demande un nettoyage important des surfaces polluées par le fer et un meulage de plusieurs millimètres sur des rives coupées.

• *Découpage au plasma*

Ce procédé, récent mais au point, évite les inconvénients de l'oxycoupage. Le plasma est un gaz ionisé, donc conducteur de l'électricité. Un jet de plasma dirigé vers une surface métallique et traversé par un courant électrique peut être fortement échauffé par effet Joule (arc transféré). Les températures atteintes (10.000 à 20.000 °C) permettent la fusion de tous les matériaux connus. Les oxydes de chrome, en particulier, qui se forment à la surface des aciers inoxydables, sont facilement fondus bien que très réfractaires.

Le découpage au plasma, deux à trois fois plus rapide que l'oxycoupage, peut être mis en œuvre dans les mêmes conditions que ce dernier, aux vitesses



DÉCOUPAGE AU GAZ PLASMA

près, soit en opération manuelle, soit en opération mécanisée (coupe et chanfreinage). Il n'entraîne, par ailleurs, qu'un brossage léger des bords ou un meulage sur une profondeur de 2 à 3/10 de mm. Le découpage au plasma ne provoque pas d'altération métallurgique des aciers inoxydables en bordure des coupes. Il peut s'appliquer à des épaisseurs de l'ordre de 4 mm, mais il trouve son meilleur domaine entre 10 et 30 mm, avec un équipement modeste, et jusqu'à 100 mm avec un équipement plus puissant. Des appareils manuels sont très appréciés pour le découpage des orifices en pleine tôle.

La plupart des constructeurs proposent des machines permettant les vitesses de découpage par plasma et sont capables d'adapter, à peu de frais, des machines existantes. Cette commodité est très appréciée des ateliers de chaudronnerie qui commencent des constructions en acier inoxydable du fait que l'investissement se réduit à la mise en place du seul organe de coupe.

• *Sciage thermique*

Le sciage thermique s'effectue au moyen de machines spéciales, à col de cygne, munies d'une lame sans fin qui défile à grande vitesse (plusieurs km/mn). La coupe se fait, non par enlèvement de copeaux, mais par propagation d'un front de fusion. Les vitesses de coupe sont comprises entre celles de l'oxycoupage et du plasma, pour les aciers inoxydables.

Les bords ainsi coupés sont comparables à ceux obtenus par le plasma mais ont une meilleure perpendicularité avec les faces. Le chantournage est possible, avec certaines machines, sur des rayons qui peuvent être inférieurs à 100 mm. Certaines machines, également, ont une gamme de vitesse permettant le sciage mécanique conventionnel.

La plage d'épaisseurs de tôle que peuvent découper ces machines est plus faible en général que ce que permet le plasma. Le col de cygne a l'inconvénient de limiter les largeurs.

Les conditions de coupe dépendent étroitement de la rigidité de la machine et de l'épaisseur à couper, mais assez peu de la nuance, dans le domaine des aciers inoxydables.

Exemple : certaines machines permettent les conditions suivantes :

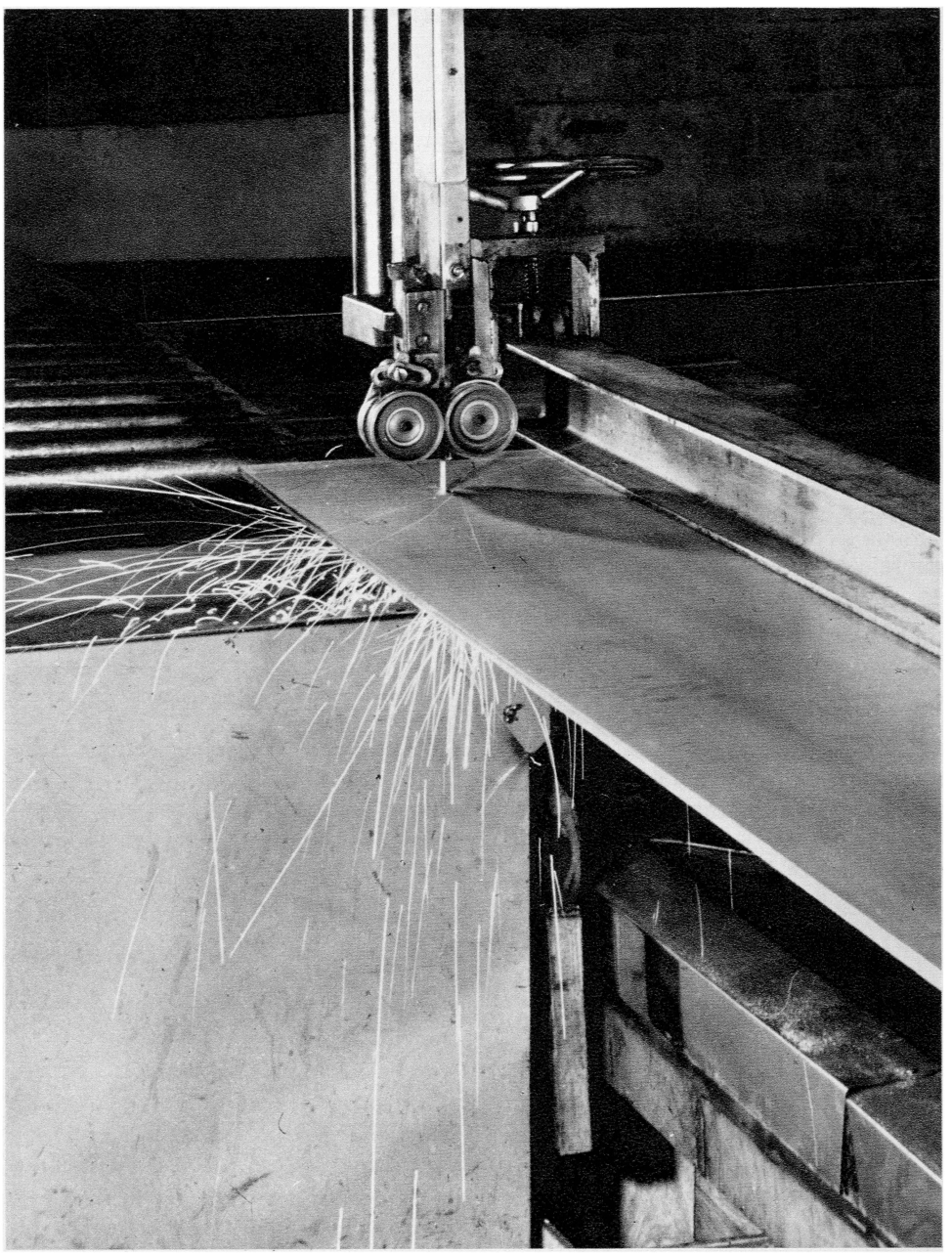
Nuance NS 22 S - épaisseur 5 mm - vitesse de lame 2.000 m/mn - avance 2 m/mn.

Nuance NSMC - épaisseur 30 mm - vitesse de lame 5.000 m/mn - avance 0,7 m/mn.

Tout découpage thermique doit être suivi d'une opération de meulage pour la reprise des rives, de façon à éliminer les zones détériorées ou scorifiées et faire apparaître le métal de base.

• *Cisaillage*

Ce procédé mécanique a l'avantage de ne provoquer aucun échauffement, ni oxydation du métal et est donc recommandable, pour les aciers inoxydables, dans le domaine d'épaisseurs où il est possible (jusqu'à 15 mm environ). L'effort de cisaillage est plus élevé pour les aciers inoxydables que pour les aciers doux et l'épaisseur maximum admissible sur une machine doit être, pour les aciers inoxydables, de 60 à 75 % de celle prévue pour l'acier ordinaire. Les outils doivent être durs et l'on obtient de bons résultats avec l'acier Z 200 C 13 (nuance UGINE KOR) ou avec des outils stellités. Du fait de la grande ductilité des aciers austénitiques, il y a avantage à réduire les jeux entre outils pour diminuer les bavures.



SCIAGE THERMIQUE

4 - TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE

Il est possible d'assembler les éléments en acier inoxydable par des techniques de boulonnage, de rivetage, de brasage et même de collage. Il existe, pour ce faire, les matières premières nécessaires dans le commerce (boulons, vis, rivets, brasures à l'argent de préférence ou à l'étain, ainsi que les flux associés, colles, etc.).

En particulier, nous conseillons les vis et boulons UGIVIS en acier inoxydable qui existent dans toutes les nuances utilisées en chaudronnerie. La société UGIVIS, 9, rue de la Py, Paris-20e (Tél. 797-53-49) adresse, sur demande, une documentation détaillée.

Mais la technique de base de la chaudronnerie des aciers inoxydables est bien le soudage autogène, plus particulièrement par les procédés électriques. En effet, le soudage au chalumeau est à déconseiller parce qu'il demande un contrôle trop précis des réglages de flamme et aussi parce que la flamme échauffe inutilement un trop grand volume de métal, ce qui ne manque pas de provoquer des modifications structurales indésirables et des tensions de retrait excessives.

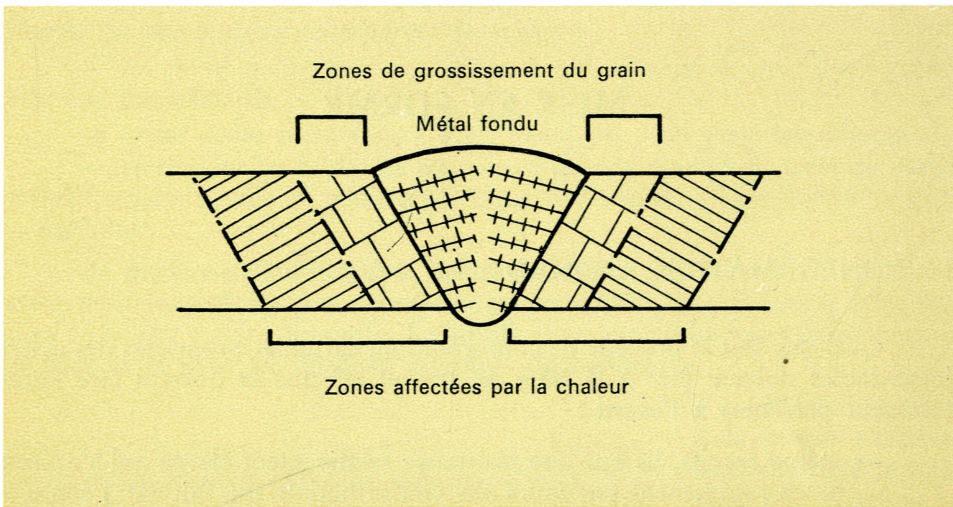
Rappelons que le soudage autogène se définit comme un procédé d'assemblage dans lequel le métal subit une fusion locale dont le but est de créer, après refroidissement, une continuité physique entre les pièces à assembler.

La quantité de métal liquide qui apparaît pendant l'opération dépend de nombreux facteurs géométriques et technologiques. Dans le soudage sans métal d'apport, ce métal liquide provient uniquement de la fusion partielle des pièces à assembler, alors que dans le soudage avec métal d'apport, il provient également de la fusion complète de ce dernier. On trouve cependant toujours dans l'opération de soudage les caractères fondamentaux suivants :

— Échauffement rapide et local du métal.
— Apparition d'une certaine quantité de métal liquide provenant des pièces à assembler et du métal d'apport lorsqu'il est utilisé.
— Formation d'un bain liquide unique.
— Refroidissement rapide de l'ensemble.

De ces caractères découlent toutes les conséquences métallurgiques de l'opération. Ce sont eux également qui permettent de différencier dans une large mesure l'opération de soudage autogène du brasage fort ou tendre; en effet, dans ces deux procédés d'assemblage, le métal liquide n'est pratiquement constitué que de métal d'apport dont le point de fusion est très inférieur à celui du métal des pièces à assembler.

Les méthodes classiques de soudage qui sont couramment employées pour l'acier doux sont également celles que l'on applique pour les aciers inoxydables. Mais, alors qu'avec l'acier doux les constructeurs pensent surtout à obtenir des soudures saines, étanches et douées de résistance mécanique, il



MÉTAL FONDU ET ZONES AFFECTÉES PAR LA CHALEUR

faut, en plus, avec les aciers inoxydables, que les soudures conservent les qualités de résistance à la corrosion qui sont la raison d'être essentielle de ces matériaux.

Pour réduire au minimum les pertes en éléments d'alliage et spécialement en chrome par oxydation, on protège le métal en fusion du contact de l'air :

— soit par un laitier qui provient de l'enrobage des électrodes dans le cas du soudage à l'arc avec électrodes enrobées,

— soit par un gaz inerte (argon ou hélium) ou par un mélange à base de gaz inerte pouvant contenir des proportions variables d'oxygène, d'hydrogène, dans le cas des soudages sous protection gazeuse,

— soit par un flux pulvérulent, isolant de l'air ambiant, interposé entre l'électrode et la pièce à souder,

— ou encore par une flamme neutre, ou légèrement réductrice dans le cas du soudage au chalumeau oxyacétylénique (ce procédé étant déconseillé en chaudronnerie pour les aciers inoxydables).

Pour éviter en cours de soudage la présence de corps étrangers carburants dans la zone fondue, il faut au préalable dégraisser soigneusement les régions à assembler. Quel que soit le procédé employé, il est recommandé de rechercher une grande propreté des rives à assembler et des métaux d'apport utilisés. Ce dégraissage devra être d'autant plus soigné que la teneur en carbone visée pour le métal d'apport est plus basse; c'est le cas, par exemple, de la nuance classique NS 22 A.

Les recommandations générales que l'on peut avoir à faire au sujet du soudage varient avec la nature de l'acier inoxydable (métal de base), du métal d'apport, et avec la technique de l'opération.

Chapitre XII

MISE EN FORME

1 - CONFORMATION A FROID

Quel que soit le procédé de conformation, certaines propriétés des aciers inoxydables doivent être à la base du travail effectué et doivent être constamment présentes à l'esprit :

— même recuits, ils ont une résistance relativement élevée qui s'accroît assez rapidement en cours de conformation du fait de l'écrouissage, principalement pour les aciers austénitiques,

— ils donnent lieu à un retour élastique élevé, dont il faut tenir compte dans la détermination des outillages.

Les aciers inoxydables ferritiques se distinguent des aciers austénitiques par leurs caractères différents de ductilité. Il en résulte que, dans les travaux d'emboutissage par exemple, les aciers ferritiques seront inférieurs aux austénitiques, lorsque le métal travaillera surtout à l'extension, alors qu'ils leur seront égaux ou même supérieurs si l'on fait « venir le métal » pour éviter les grands allongements, celui-ci travaillant alors par rétreint.

La vitesse de déformation, tant des aciers ferritiques que des aciers austénitiques, mais plus spécialement celle de ces derniers, exerce une influence marquée sur la capacité de déformation; en règle générale, de faibles vitesses de travail permettent des déformations plus importantes.

Les formes réalisables en acier inoxydable ne diffèrent pratiquement pas de celles qu'on peut exécuter en acier ordinaire. L'équipement nécessaire à leur conformation est de même nature que pour celle de l'acier ordinaire mais il doit être d'une fois et demie à deux fois plus puissant pour des opérations identiques.

Il faudra toutefois maintenir ces machines, leurs outillages et leurs tables dans un bon état de propreté et en particulier les débarrasser des graisses, poussières et marques de rouille qu'ils ont pu recevoir en travail courant. Les rouleaux de manutention gagneront à être revêtus de caoutchouc ou de tout autre revêtement mou et propre.

Les tôles en acier inoxydable sont livrées dans un état passif qui leur confère l'inoxydabilité. Il faut donc absolument éviter de les contaminer pour qu'elles gardent cet état.

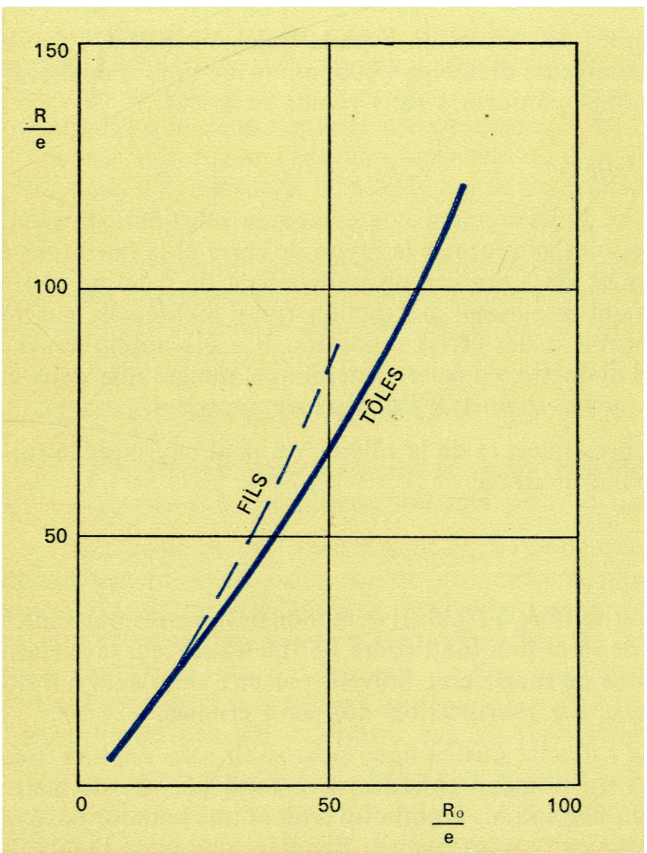
Aussi, il est indispensable que dans les ateliers de chaudronnerie on prenne les précautions nécessaires, notamment :

— ne pas marcher sur les tôles en acier inoxydable, avec des semelles cloutées par exemple,

— éviter toute incrustation d'un métal ou d'un matériau étranger,

— mettre sur les tables de travail (en général marbre d'acier) un papier adhésif ou une feuille de matière plastique sur lesquels seront posées les tôles à travailler.

En matière de lubrification, lorsqu'on réalise des éléments de chaudronnerie pour lesquels l'aspect superficiel est secondaire, la précaution principale sera de limiter l'usure des outils. La lubrification, qui est toujours indispensable, se fera alors avec les produits courants du commerce.



RETOUR ÉLASTIQUE
R est le rayon après retour élastique consécutif au cintrage d'une tôle d'épaisseur e ou d'un fil de diamètre e sur une forme de rayon Ro

Pliage : Le pliage à la presse s'effectue sans difficulté moyennant que le rayon ne soit pas inférieur à l'épaisseur de la tôle elle-même. Le retour élastique, assez important, pourra nécessiter qu'on ferme de quelques degrés l'angle des outillages si l'on cherche un angle de pliage précis.

Roulage : Cette opération ne présente aucune particularité lorsqu'on l'applique aux aciers inoxydables.

Formage des fonds : Les fonds en acier inoxydable sont couramment produits par les méthodes suivantes :

• *Formage manuel au martinet*

Cette opération, longue et onéreuse, n'est valable que pour les fabrications unitaires, hors-standard.

• *Formage par explosion*

Le principe de ce procédé est la mise à feu d'une charge explosive qui donne naissance à une onde de choc véhiculant l'énergie jusqu'à la pièce destinée à être façonnée, qui est disposée sur un outillage approprié pour assurer sa mise en forme.

Pratiquement, le milieu de transmission de l'onde de choc entre la charge explosive et la pièce à façonner peut être liquide, pâteux, pulvérulent ou gazeux. Suivant la pièce à former, divers tirs sont adoptés pour la transmission de l'énergie : en piscine, sous sable, sous cloche à vide, en virole perdue (disposée sur l'ensemble : pièce à former-matrice).

Le formage par explosion ne nécessite généralement que des outillages peu coûteux et se prête très bien à de faibles séries aussi bien qu'à de grandes. Par ailleurs, le comportement mécanique du métal est exceptionnel; le procédé permet, entre autres, d'obtenir en une seule passe de très grands allongements.

Citons comme exemples de réalisation avec la nuance NS 21 A : fonds en anse de panier à grande carre de diamètre 4.000 mm (avec tôles d'épaisseur 4 mm) - récipients sphériques conformés sans moule extérieur.

• *Formage à la molette*

Partant d'une ébauche grossièrement conformée au martinet, on peut, au moyen de machines spéciales, conformer le rayon de carre et le bord relevé entre des molettes. L'ébauche est animée d'un mouvement de rotation et les molettes assurent un rétreint progressif par action quasi ponctuelle sur la tôle. Ce procédé est applicable à des séries modestes. Il a été appliqué avec succès à des flans de grand diamètre, en acier austénitique, malgré que ceux-ci aient été fabriqués par soudage diamétral de deux demi-cercles.

Nota : Pour des profils minces relevant de la tôlerie, on peut envisager le formage aux galets ou au banc d'étirage.

Emboutissage des fonds

Cet emboutissage peut se faire à froid. Il demande des presses puissantes disposant d'un gros effort de serre-flan (de l'ordre de 100 kg/cm² sur la surface initiale couverte). Les rayons de matrice ne doivent pas être inférieurs à 4 ou 5 fois l'épaisseur de la tôle. La lubrification doit être étudiée.

Emboutissage profond : l'acier austénitique peut subir sans rupture une passe d'emboutissage avec un poinçon cylindrique à fond plat de diamètre d'environ moitié de celui du flan initial. L'embouti a alors une hauteur voisine des 3/4 de son diamètre. Pour un rapport hauteur/diamètre plus élevé l'emboutissage doit se faire en plusieurs passes. Partant par exemple d'un flan de 500 mm de diamètre, on pourra réaliser sans traitement thermique un embouti de diamètre 200 mm et de hauteur 250 mm, en trois passes, les passes intermédiaires se faisant à des diamètres 335 et 260 mm.

Fluotournage

Le fluotournage permet la fabrication de corps creux de révolution avec un minimum ou une absence totale d'usinage. Le procédé consiste à réduire l'épaisseur du métal par compression à l'aide de molettes sur une forme tournante.

Le produit de départ peut être une ébauche forgée et usinée, une ébauche emboutie, ou une ébauche obtenue par formage et soudage.

Le fluotournage peut conduire directement à la pièce finie ou être une opération intermédiaire dans une fabrication. C'est un procédé d'une très grande souplesse qui permet d'obtenir des pièces d'épaisseur variable et de forme complexe. Il est particulièrement avantageux pour les fabrications en faibles séries, à condition que l'on dispose de l'outillage nécessaire.

Les aciers inoxydables se prêtent bien aux opérations de fluotournage. Les conditions de travail : taux de réduction par passe, avance de molette, vitesse de rotation, doivent être déterminées en fonction de la forme de la pièce, de la puissance de la machine, de la résistance et de la ductilité du métal ainsi que de sa capacité d'écrouissage. Il est par conséquent impossible d'énoncer des règles générales; cependant, il est courant de pratiquer des réductions d'épaisseur de 30 à 40 % par passe avec les aciers inoxydables austénitiques et ferritiques.

Ce procédé est maintenant de plus en plus utilisé pour certaines pièces de série, par exemple pour des fonds destinés à des réservoirs cryogéniques. Il nécessite des machines robustes, exemptes de vibration.

2 - CONFORMATION A CHAUD

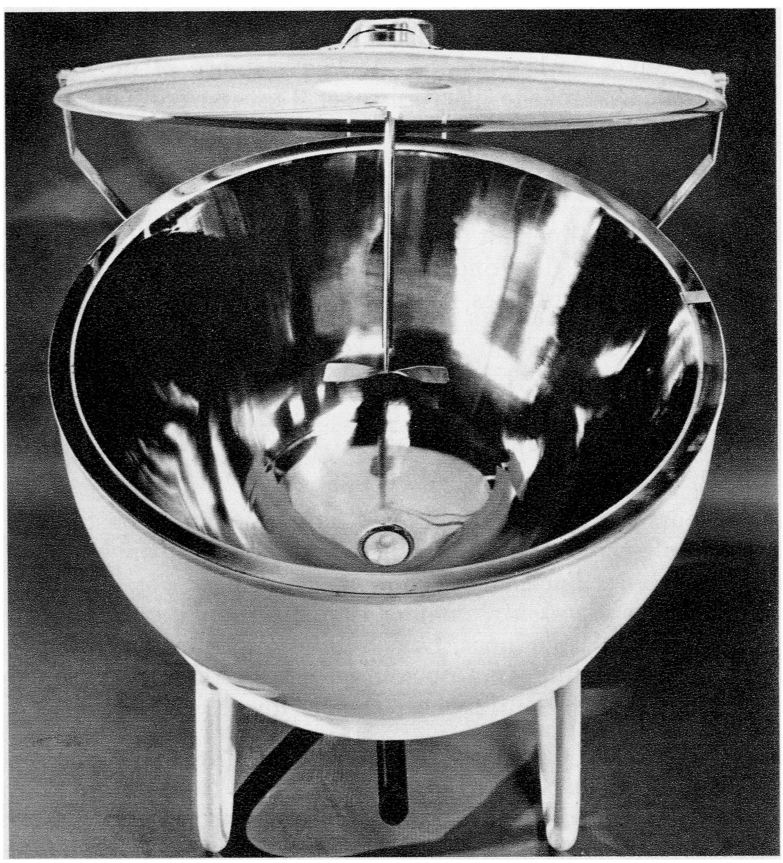
La conformation à chaud des aciers inoxydables doit être évitée dans tous les cas, et ils sont nombreux, où elle peut se faire à froid.

Les brûleurs des fours seront réglés pour que le combustible soit brûlé complètement, c'est-à-dire qu'on recherchera une atmosphère neutre non susceptible de carburer l'acier inoxydable. Lorsque c'est possible il est recommandé de placer les pièces à réchauffer dans un moufle en acier réfractaire, les isolant du contact des flammes. Le chauffage électrique dans l'air est tout à fait convenable. Le chauffage au mazout se fera de préférence avec des fuels légers, moins chargés en soufre que les fuels lourds.

Le refroidissement des pièces doit être lent pour les aciers martensitiques, naturel à l'air pour les aciers ferritiques, à l'air ou à l'eau pour les aciers austénitiques. Dans tous les cas, l'opération de formage devra être suivie d'un traitement thermique appliqué aux pièces refroidies (revenu pour les martensitiques, recuit pour les ferritiques, hypertrempe pour les austénitiques). Enfin, il faudra toujours éliminer par décapage les oxydes superficiels, produits par le formage à chaud, avant de procéder à l'assemblage des pièces.

Le formage à chaud ne présente pas de difficultés particulières autres qu'une résistance à chaud élevée pour les aciers austénitiques. On évitera facilement les altérations superficielles de l'acier au prix de quelques précautions. L'oxydation en surface, est bien sûr, inévitable. La précaution à prendre contre la carburation est un nettoyage et un dégraissage des surfaces avant réchauffage, et si l'on prend soin de ne pas appliquer trop longtemps des températures élevées au métal, on ne constatera pas de grossissement de grain appréciable. Il est bon de se reporter aux notices UGINE des nuances où sont précisées les conditions de forgeage.

Il est toutefois recommandable de faire forger les pièces d'accessoires de forme compliquée par des spécialistes plutôt que d'en entreprendre la fabrication avec des moyens de fortune (chauffage au chalumeau ou au « feu de forge » par exemple).



CUVE HÉMISPHÉRIQUE DE RÉFRIGÉRATION
(FABRIQUÉE PAR FLUOTOURNAGE)
ACIER 18-10 (NS 21 A)

Chapitre XIII

MÉTAUX D'APPORT POUR LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES

Le choix du métal d'apport pour le soudage, lorsqu'il en est besoin, dépend évidemment des nuances à assembler. Pour des considérations d'ordre métallurgique, il peut dépendre aussi du procédé de soudage utilisé et des conditions d'emploi de l'appareil chaudronné. Il faut donc choisir dans chaque cas le métal d'apport le mieux adapté au problème envisagé.

1 - SOUDAGE DES ACIERS MARTENSITIQUES A 13 % DE CHROME

La difficulté du soudage des aciers martensitiques vient de ce qu'ils sont autotrempants, ce qui entraîne le risque de tapures au refroidissement, favorisées par la moindre amorce de rupture telle qu'un manque de pénétration ou un caniveau par exemple. Comme tous les aciers autotrempants ils peuvent manifester la fissuration sous cordon consécutive à la grande différence de solubilité de l'hydrogène dans l'austénite et dans la martensite.

Il est cependant possible d'obtenir des soudures saines et sans tapure moyennant les particularités opératoires suivantes :

— Préchauffage des pièces à souder entre 200 et 300 °C.

— Protection du métal fondu contre l'hydrogène :

  • usage d'argon pur et sec,

  • emploi d'électrodes basiques correctement étuvées.

— Emploi de métal d'apport austénitique 18-10 (lorsque ce n'est pas contre-indiqué).

— Traitement de revenu de la martensite formée aussitôt après le refroidissement de la soudure (700° pendant 2 heures par exemple).

Le refroidissement après soudure et la remontée en température pour le revenu à 650-700 °C doivent se faire aussi lentement que possible.

La rigueur de ces précautions décroît avec la teneur en carbone de ces aciers; on peut alors s'en dispenser, dans certains cas simples, mais il est néanmoins recommandé de nous consulter à chaque fois.

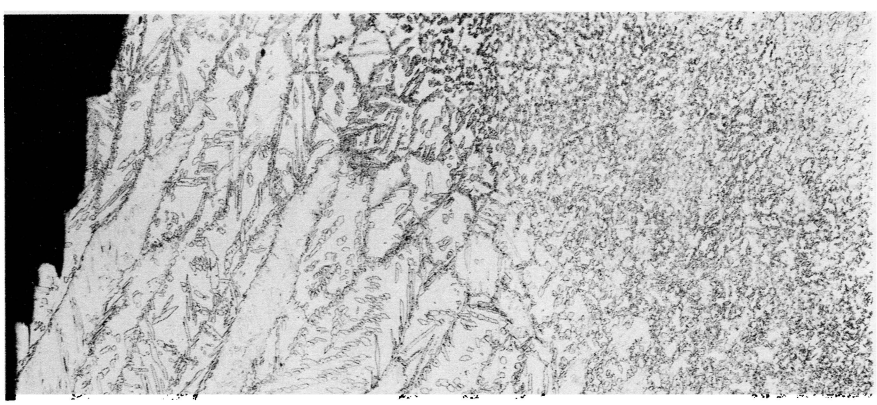
2 - SOUDAGE DES ACIERS FERRITIQUES A 17 % DE CHROME

La soudabilité opératoire des aciers ferritiques est bonne si l'on entend par là qu'on peut obtenir facilement des soudures compactes et exemptes de fissures.

Cependant, dans la zone fondue et dans la zone affectée par la chaleur, la structure du métal est à gros grains et partiellement martensitique, ce qui rend fragiles les soudures qui risquent de mal résister à des efforts mécaniques ou à des chocs thermiques. Ceci explique que les aciers ferritiques soient relativement peu chaudronnés.

Normalement on peut prendre comme métal d'apport une nuance à 17 % de chrome, mais une amélioration sensible du joint est possible par l'emploi d'un métal d'apport austénitique, comme UGINARC 23 S, qui produit un cordon plus ductile.

Une amélioration supplémentaire peut être obtenue au moyen d'un traitement thermique provoquant le revenu de la martensite précipitée dans la zone affectée par la chaleur voisine du cordon. Ce revenu, opéré à 780 °C sur le F 17, confère au joint une ductilité comparable à celle du métal de base, au moins pour les déformations lentes, mais la fragilité du joint demeure.



COUPE D'UNE SOUDURE PAR FUSION EN ACIER A 17 % DE CHROME
(GROSSISSEMENT 35)

Pour fixer les idées, la résilience Charpy (entaille en V) à l'ambiante d'un joint en F 17, soudé avec un métal d'apport austénitique et traité à 780 °C, sera faible.

Il faut remarquer qu'au-delà de 150 °C, les soudures redeviennent ductiles, d'où l'emploi commode de ces nuances aux températures élevées.

Ainsi, le même essai exécuté à des températures plus élevées donnera des chiffres de résilience rapidement croissants, par exemple :

— à 100 °C 5 daJ/cm² environ
— à 150 °C 10 daJ/cm² »
— à 250 °C 20 daJ/cm² »

Il en résulte des domaines possibles d'utilisation des aciers ferritiques dans les constructions soudées, soit que les chocs ne soient pas à craindre en cours d'utilisation, soit que la température de fonctionnement soit assez élevée, 100 °C ou plus pour fixer les idées.

3 - SOUDAGE HOMOGÈNE DES ACIERS AUSTÉNITIQUES

Le domaine des facteurs favorables à la bonne soudabilité opératoire des aciers austénitiques est maintenant bien connu et conduit à l'observation de quelques conditions, en général faciles à respecter.

Deux considérations interviennent dans le choix du métal d'apport :

— le métal déposé doit avoir les mêmes qualités de résistance à la corrosion que le métal de base,

— le joint soudé doit être sain, exempt en particulier de fissures.

Cela conduit à utiliser une analyse de métal d'apport voisine de celle du métal de base, pour le chrome, le nickel ou le molybdène et spécialement en ce qui concerne le carbone, pour que la soudure ne soit pas éventuellement un point faible de la construction en ce qui concerne la corrosion.

Les niveaux de carbone que l'on trouve couramment dans le commerce sont principalement : $C \leqslant 0{,}045\ \%$, $C \leqslant 0{,}030\ \%$ et, pour des applications moins fréquentes, $C \leqslant 0{,}020\ \%$.

Cependant, l'analyse doit être aménagée pour conduire à une soudure de bonne qualité.

Fissuration à chaud

Un phénomène à éviter, lorsque l'on soude les aciers inoxydables austénitiques, est celui de la fissuration à chaud à laquelle ces aciers sont plus sensibles que d'autres si l'on n'y prend garde, d'autant que les contraintes de soudage sont plus importantes pour les aciers austénitiques que pour les aciers courants; cela résulte essentiellement du plus grand coefficient de dilatation des austénites, mais aussi de leur plus grande résistance mécanique à chaud, peu favorable à la relaxation.

Cette fissuration, au joint cristallin de la structure de solidification, peut intervenir pendant le refroidissement de la soudure, à des températures supérieures à 1.200 °C, par suite de phénomènes de ségrégation : il se produit en fin de solidification un film liquide interdendritique à bas point de fusion riche en éléments comme le soufre, le phosphore, le bore, le niobium, le silicium, etc. Lorsque les contraintes de retrait interviennent, ce film liquide prive de cohésion la structure où apparaissent alors les fissures.

Pour limiter le phénomène, on veillera d'abord à ce que les teneurs en éléments nuisibles soient les plus basses possible : c'est ce que prévoient généralement l'aciériste et le fabricant d'électrodes, si bien que l'utilisateur n'a pas à s'en préoccuper.

Cette précaution n'est toutefois pas toujours suffisante, soit que les conditions de bridages soient très sévères, ou que le soudage crée un bain abondant et lent à se refroidir, soit que des considérations de résistance à la corrosion intercristalline ou d'usinabilité du métal de base imposent la présence dans le métal d'éléments nuisibles quant à la fissuration à chaud (niobium - soufre).

MÉTAL FONDU D'UNE SOUDURE AUSTÉNO-FERRITIQUE EN ACIER DE TYPE 18-10
(GROSSISSEMENT 450)

On veillera dans ce cas à choisir un métal d'apport à tendance ferritique suffisante, sauf considérations contraires évoquées plus loin.

Tendance ferritique du métal d'apport

Les aciers inoxydables austénitiques déposés par soudure possèdent, généralement après refroidissement jusqu'à l'ambiante, une structure mixte austéno-ferritique différente de la structure entièrement austénitique du métal de base hypertrempé à 1.000/1.100 °C.

Ces aciers traversent, au cours du refroidissement depuis l'état liquide, un domaine de température dans lequel la ferrite δ existe en proportion importante. La régression de cette ferrite en austénite n'est complète que si le refroidissement est assez lent pour que le métal séjourne un certain temps dans le domaine de température où cette régression est rapide.

Dans le cas des soudures, le refroidissement est relativement rapide; il peut donc laisser subsister à la température ambiante une quantité de ferrite résiduelle qui est l'image de la proportion plus élevée qui existait à haute température. Cette quantité est appelée ferrite du métal déposé, ou tendance ferritique du métal d'apport.

Cette teneur résiduelle dépend de la composition du métal d'apport (voir interprétation du diagramme de Schaeffler). Elle est aussi d'autant plus importante que le refroidissement est plus rapide dans le domaine de températures supérieures à 1.250 °C.

On constate d'une façon générale que ce sont les soudures purement austénitiques après refroidissement complet qui sont les plus sensibles à la fissuration. Toutes considérations restant égales par ailleurs, la sensibilité de la fissuration à haute température du métal fondu diminue quand sa tendance ferritique augmente.

Dans les conditions normales de soudage des aciers du type 18-10, la teneur nécessaire pour être à l'abri de la fissuration est généralement comprise entre 2 et 8 % environ.

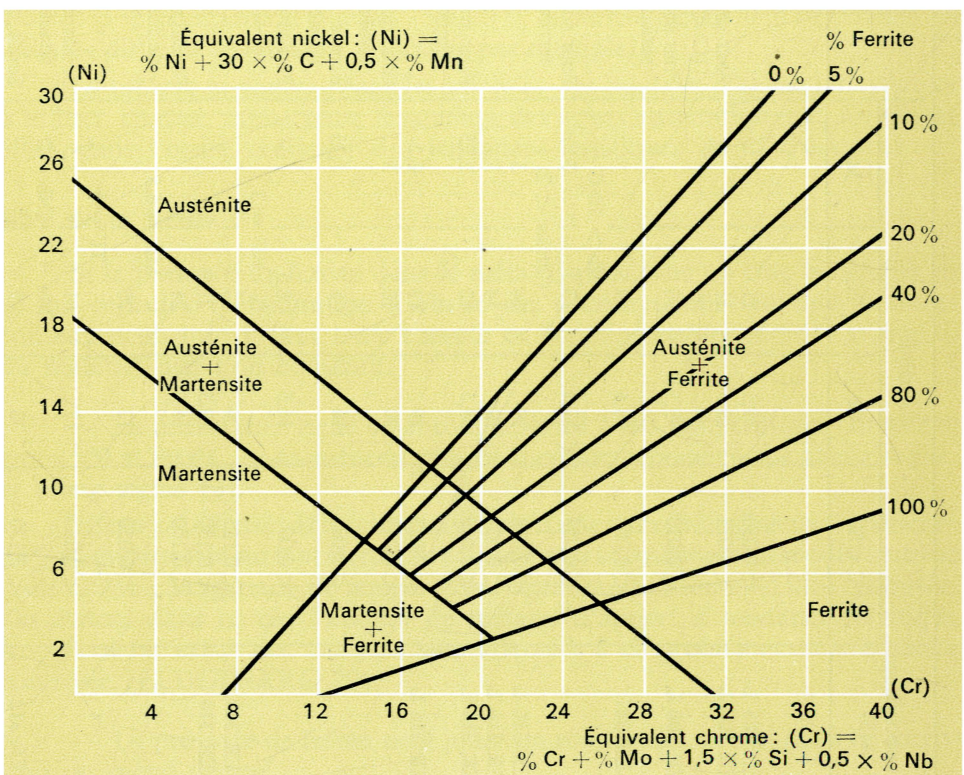


DIAGRAMME DE SCHAEFFLER

Le diagramme de Schaeffler permet de prévoir, au vu de l'analyse d'un métal d'apport, la teneur en ferrite du métal déposé par soudage, opération où les conditions de refroidissement sont relativement rapides.

En ordonnée on porte l'« équivalent Nickel », c'est-à-dire la somme de la teneur en nickel et des teneurs en carbone et manganèse (éléments gammagènes stabilisant l'austénite) affectées des coefficients ci-dessus qui mesurent leur efficacité par rapport à celle du nickel. En abscisse, on porte l'« équivalent Chrome », calculé de la même façon avec le molybdène, le silicium et le niobium (éléments alphagènes qui favorisent la formation de ferrite).

La position sur le diagramme du point représentatif ainsi défini permet de prévoir la structure du métal déposé et sa teneur en ferrite (lue sur la partie située à droite) si l'on se trouve dans la zone Austénite + Ferrite.

NUANCES POUR LE SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES ET FORTEMENT ALLIÉS

(MÉTAL D'APPORT)

Les correspondances en gras sont rigoureuses.

Appellation de la nuance UGINE	Correspondance AISI	Analyse				Commentaires
		C s/fil	Cr	Ni	Mo	
★ : nuance tenue en stock						
UGINARC 23 S ★	ER 308 L	⩽ 0,030	19,5	11		
UGINARC 23 L ★	ER 308 L	⩽ 0,015	19,5	11		Pour souder les 18-10 à très bas carbone (C ⩽ 0,020 %)
UGINARC 23 S1 ★	**ER 308 L**	⩽ 0,030	19,5	10		Pour souder les 18-10 en cas de risques sérieux de fissuration à chaud
UGINARC 23 X	**ER 347**	⩽ 0,080	19,5	9,5 Nb > 10 C		
UGINARC M 22 F		⩽ 0,035	17,5	13,5 (ferrite < 2)	3	Pour souder les 18-10 Mo - très basse ferrite (< 2 %)
UGINARC MKS ★	ER 316 L	⩽ 0,030	19	14	3	
UGINARC MKL ★	ER 316 L	⩽ 0,020	19	14	3	
UGINARC MKS1 ★	**ER 316 L**	⩽ 0,030	18,5	12	2,75	Pour souder les 18-10 Mo en cas de risques sérieux de fissuration à chaud
UGINARC MHS	**ER 316 L**	⩽ 0,025	19	13	2,2	
UGINARC MK2 ★		⩽ 0,045	20	10,5	3	Soudages hétérogènes - soudage des aciers austénitiques (ferrite 15 % environ)
FLUGINARC 20		⩽ 0,09	16	8	1,75	Ferrite contrôlée - soudage des aciers réfractaires type NS 21 C et NS 190
FLUGINARC 21		⩽ 0,09	16,5	8,5 W = 3		Ferrite contrôlée - soudage du NS 190
UGINARC R 27 ★	**ER 309**	⩽ 0,115	24	13		
UGINARC R 31 ★	**ER 310**	⩽ 0,150	27,5	21,5		
UGINARC R 31 M		⩽ 0,100	26	21 Mn = 6,5		Soudage des 25-20 lorsqu'il y a risques de fissuration à chaud
FLUGINARC N 70		⩽ 0,050	17	70 Ti = 3		
FLUGINARC N 65		⩽ 0,08	17	67 Mn = 3 - Nb = 2	1,5	Soudage des alliages à base nickel - soudages hétérogènes
UGINARC 39	**ER 312**	⩽ 0,130	30	9		Soudage des aciers trempants - soudages hétérogènes

Dans la pratique, on peut conseiller l'emploi de trois niveaux de tendance ferritique :

— pour les emplois courants, et dans les procédés classiques (électrodes enrobées - TIG) des dépôts de 2 à 5-7 % de ferrite sont sains et compacts,

— si le métal de base et le métal d'apport contiennent du niobium, il faut environ 10 % de ferrite dans le métal déposé si l'on veut éviter les fissures. La même structure est souhaitable avec le procédé MIG (type spray-arc) ou le soudage sous flux, qui conduisent à des bains liquides abondants,

— d'autres métaux d'apport, par exemple UGINARC MK2 : 20 % Cr - 10,5 % Ni - 3 % Mo, et UGINARC 39 : 30 % Cr - 9 % Ni, qui conduisent à des dépôts comportant plus de 15 à 20 % de ferrite permettent de souder les nuances difficiles (contenant du soufre par exemple).

Le tableau ci-contre donne les analyses des nuances d'aciers inoxydables à utiliser comme métal pour le soudage des aciers austénitiques et fortement alliés, dans l'ordre croissant des tendances ferritiques de fil d'apport.

Rôle de la ferrite

Si la présence de ferrite dans le métal déposé joue un rôle bénéfique en ce qui concerne la fissuration à chaud des soudures, elle implique d'autres conséquences dont il faut tenir compte en fonction des conditions d'emploi du matériel que l'on construit.

— La ferrite, très riche en chrome, portée à des températures comprises entre 500 et 900° C, se transforme plus ou moins lentement en une phase fragile, la phase sigma (σ).

Si le métal déposé par soudure en contient une quantité suffisante (supérieure à 8 % en pratique) et surtout en réseau continu, et si la construction soudée s'utilise dans la zone dangereuse de température, cette fragilisation peut être redoutée. On évitera dans ce cas l'emploi de métaux d'apport à tendance ferritique trop forte; il existe des analyses bien adaptées à ce problème, dites à ferrite contrôlée (FLUGINARC 20).

— La présence de ferrite peut jouer un rôle dans la résistance à la corrosion du métal déposé.

Le rôle est bénéfique en ce qui concerne la corrosion intercristalline, particulièrement dans les 18-12 Mo : c'est encore un avantage des électrodes du type 20-10-3 (UGINARC MK2). Il ne peut être nuisible que dans de rares conditions d'emploi, comme celles qui correspondent à des milieux très oxydants tels que l'acide nitrique concentré chaud. Il faut citer le fait que les carbamates d'urée ont une action corrosive préférentielle pour la ferrite.

— Enfin la ferrite est magnétique, alors que l'austénite ne l'est pas.

Il ne faut pas perdre de vue ces phénomènes en décidant de la tendance ferritique du métal d'apport.

Influence du manganèse

La présence de 6 à 9 % de manganèse dans des métaux d'apport entièrement austénitiques, du type 18-10 ou 25-20, permet de réduire les phénomènes de fissuration à chaud : de tels matériaux d'apport sont parfois utilisés lorsque la présence de ferrite est impossible, ou non souhaitée.

Cas particuliers

a) Comme c'est le cas pour tous les métaux, il existe des conditions susceptibles de favoriser la formation de soufflures dans les cordons d'aciers inoxydables austénitiques. L'oxygène, et surtout l'hydrogène, en sont les principaux responsables du fait de leur plus grande solubilité dans le métal liquide que dans le métal solidifié.

Il en résulte la nécessité de protéger les bains de soudure de l'air ambiant et de l'humidité, à l'endroit et à l'envers, de décalaminer les bords à souder si besoin est avant la fusion, et de n'utiliser des gaz de protection que modérément chargés en hydrogène (10 % au maximum pour les aciers du type 18-10, 5 % au maximum pour les aciers plus chargés en nickel : 24-12, 25-20, 15-35, 20-80, etc.).

b) Il existe enfin un type de fissuration possible bien qu'assez rare, par le cuivre lorsque celui-ci est déposé accidentellement à la surface d'un acier inoxydable austénitique.

Dans la zone affectée par la chaleur entre le point de fusion du cuivre (1.080 °C) et le point de fusion de l'acier, des pénétrations intergranulaires de cuivre, rapides et profondes, fragilisent l'acier et peuvent entraîner sa fissuration sous les contraintes de retrait. Le remède est simple puisqu'il consiste à éviter les contaminations par le cuivre. Les lattes de soutien des envers, souvent en cuivre, peuvent amener ces contaminations. On les évitera en éloignant suffisamment les lattes de l'axe du cordon, en les refroidissant par circulation d'eau, et si besoin en les nickelant.

4 - SOUDAGES HÉTÉROGÈNES

Lorsqu'on soude un acier inoxydable austénitique avec un acier moins chargé (acier au carbone, aciers inoxydables au chrome, etc.), on tiendra compte des phénomènes de dilution, appauvrissant le métal déposé en éléments nobles et l'enrichissant en carbone dans certains cas, qui peuvent faire apparaître des zones martensitiques fragiles. Pour limiter ce phénomène, on utilisera avec avantage des métaux d'apport comportant de fortes teneurs en éléments d'alliage : un métal à 65 % de nickel et 15 % de chrome (FLUGINARC N 65) est, à cet égard, d'une grande sécurité d'emploi. L'emploi de nuances austéno-ferritiques du type 20-10-3 (nuance UGINARC MK2) permet d'éviter également la formation de zones fragiles.

Il faudra se rappeler que les aciers austénitiques et les aciers ferritiques ont des coefficients de dilatation très différents et que les joints exécutés entre

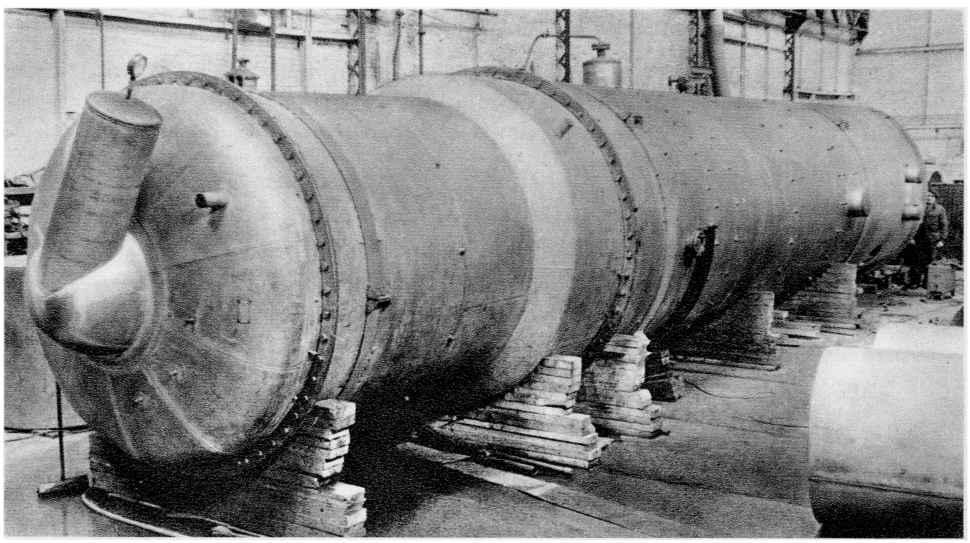
deux aciers de types différents seront, si les pièces sont utilisées à chaud, soumis à des contraintes thermiques importantes, en particulier dans le cas de chauffages et refroidissements alternés. Dans ce cas, il faudra employer comme métal d'apport notre nuance FLUGINARC N 65 dont le coefficient de dilatation est compris entre celui des aciers austénitiques et celui des aciers ferritiques.

5 - REVÊTEMENTS PAR DÉPOT

Pour rendre inoxydables les parois de récipients massifs en acier ordinaire, on y dépose par soudage une couche d'acier inoxydable. On peut mettre en œuvre, soit le soudage sous argon, soit le soudage sous flux électroconducteur. Le métal d'apport est du fil ou du feuillard d'acier inoxydable, suivant les techniques employées.

Dans le choix de la nuance d'apport, il faut évidemment tenir compte de la dilution. L'emploi d'un acier type 24-12 à très bas carbone est très répandu : le métal déposé a en surface la composition d'un acier type 18-10 à carbone moyen. Si l'on désire un carbone plus faible encore, un second dépôt est exécuté avec un acier 18-10 à très bas carbone.

Nota : Nous recommandons aux praticiens désireux d'approfondir les questions métallurgiques posées par le soudage des aciers inoxydables, la lecture de l'ouvrage « Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud » de René CASTRO et Jean-Jacques de CADENET (Dunod Éditeur).



COLONNE EN ACIER 18-10 (NS 21 S)

Chapitre XIV

CORROSION DES CORDONS DE SOUDURE

Dans le cas d'un **soudage hétérogène,** l'assemblage de l'acier inoxydable à un métal ou à un alliage de composition très différente est susceptible dans certains cas de présenter un risque de corrosion par couplage galvanique.

Les deux métaux constituent alors les éléments d'une pile, le métal se corrodant étant en position d'anode avec dissolution du métal, l'autre de cathode sur laquelle il y a réduction d'un composé présent dans le milieu ambiant. Si les aires anodiques sont d'importance nettement plus faible que les aires cathodiques, la densité de courant aux anodes peut devenir importante et les effets de la corrosion plus sévères que prévu.

Toutefois, le risque de corrosion ne doit pas être surestimé et des mesures électrochimiques simples permettent de l'évaluer; s'il existe une crainte, le soudage est à proscrire; il faut recourir à des techniques d'assemblage permettant d'isoler électriquement l'acier inoxydable de l'autre matériau (utilisation de douilles, rondelles, etc. en matière isolante).

Dans le cas de **soudage homogène,** lorsque l'acier inoxydable est soudé à lui-même ou à un autre acier d'analyse voisine, le risque de corrosion par couplage galvanique est nul, car, pour des raisons de technologie de soudage, le métal déposé possède souvent une teneur plus élevée en éléments d'alliage et le cordon de soudure plus allié sera en position de cathode, donc protégé.

Par ailleurs, la surface du cordon est peu importante en regard de celle du métal de base et le rapport cathode/anode est très faible, éliminant pratiquement tout risque. Cependant, deux phénomènes peuvent avoir lieu :

a) un phénomène structural dû au fait qu'au cours d'une opération de soudage le métal de base subit un traitement thermique à des températures variant entre la température de fusion (zone adjacente au cordon de soudure) et la température ambiante (régions éloignées du cordon).

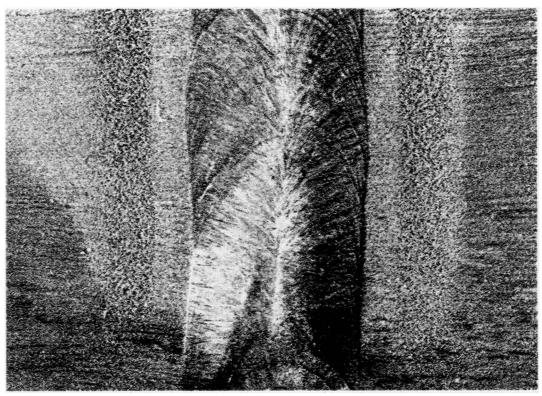
Il y a alors dans les aciers inoxydables austénitiques précipitation de carbures de chrome intergranulaires, origine de la corrosion intercristalline. Les moyens de prévenir cette corrosion ont été indiqués page 48.

Rappelons qu'en milieux nitriques concentrés et chauds peut se produire au ras du cordon de soudure la corrosion « incisive ».

b) des contraintes résiduelles de soudure, dont l'importance dépend des matériaux assemblés, de leur épaisseur et des conditions technologiques du soudage; elles peuvent quelquefois conduire à la corrosion sous tension.

Ce type de corrosion a été constaté, pour les aciers inoxydables austénitiques, dans les milieux suivants : eau chaude et vapeur d'eau à des températures supérieures ou égales à 80 °C, certaines solutions alcalines très chaudes contenant de l'hydrogène sulfuré, du sulfure de sodium ou des phénols; mais, incontestablement, ce sont les solutions contenant des ions chlorure et un système oxydant, pouvant être l'oxygène dissous, qui provoquent le plus souvent la corrosion sous tension des aciers inoxydables austénitiques de type classique, 18 % de chrome et moins de 20 % de nickel.

Ainsi lorsque existe un tel risque de corrosion sur des échangeurs, on y remédie en employant un acier austénitique au molybdène, et lorsque l'on se trouve en présence d'eaux saumâtres il faut épurer éventuellement et éviter la stagnation, les dépôts de matières solides, etc.



CORROSION INTERCRISTALLINE DES ZONES AFFECTÉES PAR LA CHALEUR D'UNE SOUDURE EN ACIER 18-10 A 0,06 % DE CARBONE (GROSSISSEMENT 2)

Plusieurs autres moyens peuvent être employés :

— éviter le soudage d'aciers austénitiques sur des métaux ayant un coefficient de dilatation nettement différent, ou bien procéder à un recuit de détente après soudage, mais en réservant cette opération aux seuls aciers stabilisés,

— agir sur l'état de surface des pièces par décapage, sablage ou grenaillage (voir page 119),

— jouer sur l'analyse du métal; l'accroissement de la teneur en nickel du métal améliore la tenue des aciers inoxydables austénitiques; les aciers du type 18 % Cr - 18 % Ni ou plus alliés offrent une très bonne résistance. Toutefois, pour les emplois les plus sévères, une teneur de 40 % en nickel est nécessaire pour une sécurité absolue,

— assurer une exploitation évitant la stagnation des liquides ainsi que le dépôt de matières solides (nettoyages).

Chapitre XV

PROCÉDÉS DE SOUDAGE

Les méthodes classiques de soudage qui sont couramment employées pour l'acier doux sont également celles que l'on applique pour les aciers inoxydables, mais il faut, en plus, avec ces derniers, que les soudures conservent les qualités de résistance à la corrosion qui sont la raison d'être essentielle de ces métaux.

Les techniques courantes de soudage employées en chaudronnerie sont les suivantes :

1 - SOUDAGE A L'ÉLECTRODE ENROBÉE

Ce mode de soudage est parfaitement adapté aux aciers inoxydables et plus particulièrement aux aciers austénitiques. On obtient facilement des soudures saines et ductiles dont la résistance à la corrosion égale celle du métal de base. Le procédé se limite toutefois, dans les travaux courants, aux épaisseurs supérieures à 1,2 mm.

La soudure à l'arc exige l'emploi d'électrodes recouvertes d'un enrobage spécialement étudié, rutile ou basique, qui, en fondant, constitue une protection du métal liquide. La composition de l'électrode est généralement aménagée de façon à ce que les pertes en éléments scorifiables (chrome) soient compensées. Certains éléments sont entièrement brûlés : par exemple le titane. Il est donc nécessaire, lorsqu'on soude des aciers stabilisés au titane (NS 21 C et NSMC), d'abaisser la teneur en carbone de l'électrode au-dessous de celle du matériel à souder. Cette précaution est d'autant plus nécessaire qu'il peut y avoir enrichissement du cordon en carbone par l'enrobage et par contamination (produits gras par exemple).

Les nuances utilisées pour les électrodes sont dérivées par modification des aciers des types 18-10, 24-12 et 25-20. Des éléments d'addition comme le molybdène, le niobium sont souvent introduits dans l'enrobage. Parfois même (électrodes à grand rendement) l'âme est en acier ordinaire, tous les éléments d'addition étant dans l'enrobage : leur emploi doit donc faire l'objet, en atelier, d'une surveillance constante, toute électrode abîmée donne lieu à un dépôt d'analyse incorrect.

La résistivité élevée et la faible conductibilité thermique qui caractérisent les aciers inoxydables austénitiques conduisent à utiliser des électrodes plus courtes que pour l'acier ordinaire ou des électrodes à prise centrale : en effet, les baguettes enrobées chauffent rapidement et risqueraient de s'écailler par échauffement excessif si elles étaient parcourues trop longtemps par le courant.

Le tableau ci-après montre les divers types de joints que l'on peut réaliser suivant l'épaisseur des pièces à souder :

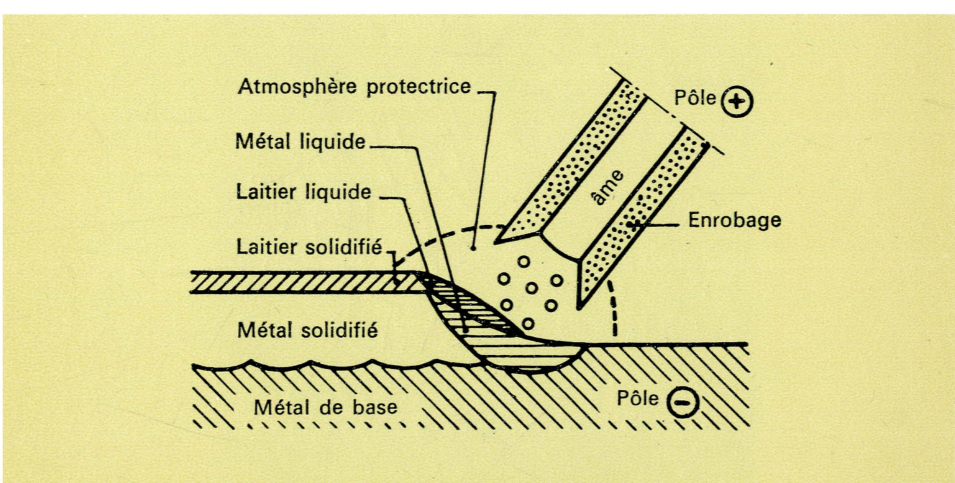
Épaisseurs en mm	Préparation des bords	Écartement	Passes à effectuer
1,5 à 3	Bruts de cisaillage	0 à 0,5 mm	1 cordon, reprise côté du milieu corrosif recommandée, surtout dans le cas de l'industrie chimique.
4 à 10	Chanfrein en V sur une face	1,5 à 3 mm	1 à 3 cordons suivant l'épaisseur avec reprise à l'envers.

Lorsqu'une pièce a reçu un ou plusieurs cordons sur les deux faces, c'est le cordon déposé en dernier lieu qui devra être en contact avec le milieu le plus corrosif : c'est lui, en effet, qui se trouve dans les meilleures conditions du point de vue de la résistance chimique, tandis que les premiers subissent un réchauffage dans la zone des températures dangereuses.

C'est en général sur les premiers cordons que repose la résistance mécanique de l'assemblage; ils devront être assez importants et assurer une bonne pénétration. Le dernier, au contraire, sera très mince et devra présenter un faible relief, en particulier s'il doit être meulé.

Il est toujours recommandé d'exécuter les soudures avec reprise à l'envers, surtout lorsque les appareils doivent travailler sous pression ou vibration, ceci afin d'éviter toute amorce de rupture.

Lorsque les cordons sont exécutés en plusieurs passes, il faut nettoyer à fond la surface de chaque dépôt afin d'effectuer le suivant, ceci pour ne pas emprisonner du laitier ou des oxydes.



PRINCIPE DU PROCÉDÉ A L'ÉLECTRODE ENROBÉE

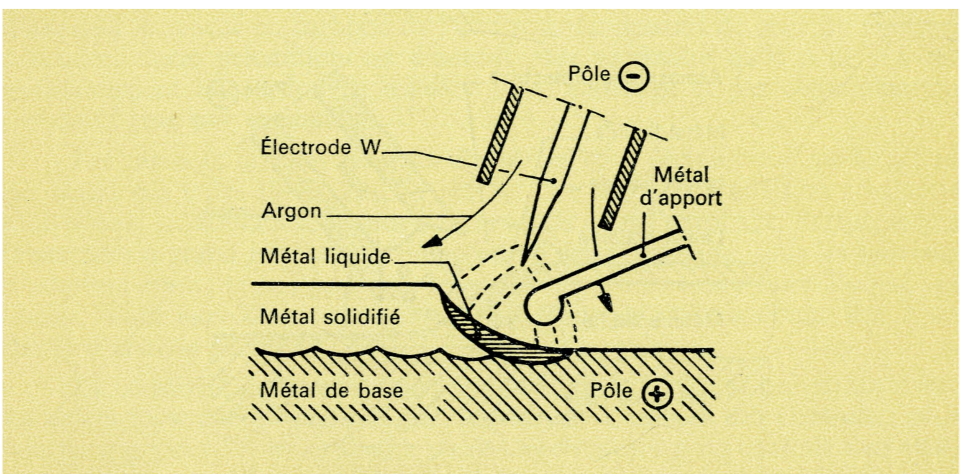
2 - PROCÉDÉ TIG (Tungsten Inert Gas)

L'arc électrique jaillit entre la pièce et une électrode réfractaire, en tungstène, le bain liquide étant protégé par de l'argon. Ce procédé permet un soudage continu, régulier et produit des cordons lisses et compacts; il nécessite une préparation soignée des bords à souder, mais les cordons sont très faciles à nettoyer à la brosse.

La polarité est directe (— à l'électrode). Les variantes sont multiples, manuelles ou automatiques, avec ou sans métal d'apport. Exigé par certains cahiers des charges, ce procédé assez coûteux s'applique bien aux épaisseurs minces et il peut être rentable pour l'exécution des passes de fond, sur « soutien » à l'envers, pour des épaisseurs fortes. En effet, ce soudage présente l'avantage de donner des cordons de bonne qualité, toujours visibles pendant le soudage et de ce fait il permet de réduire, voire d'éliminer, les frais de réparation des passes de fond.

L'apport de chaleur est assez concentré; on peut donc souder des tôles minces : à partir de 0,4 mm d'épaisseur. On soude également des tôles épaisses, jusqu'à 25 mm.

Les tôles minces peuvent être soudées sans métal d'apport. A partir de 3 mm, ce dernier est nécessaire. Dans les procédés automatiques, on utilise du fil en couronne, ou enroulé sur tourets, de diamètre supérieur à 2 mm; en soudage manuel on utilise des fils dressés, ou coupés dans des couronnes. On évitera de dénuder des électrodes enrobées pour en faire des baguettes d'apport car des éléments d'alliages ayant pu se trouver intentionnellement dans l'enrobage, la composition du métal déposé devient alors incertaine.



PRINCIPE DU PROCÉDÉ TIG

Le tableau ci-après donne quelques indications concernant le procédé TIG dans le cas du soudage manuel.

Épaisseurs mm	Intensité A	⌀ métal d'apport mm	Débit argon l/mn	⌀ électrode tungstène mm
0,6	25		2	1
0,8	35		2	1
1	50		2	1,5
1,5	80	1,5	3	1,5
2	100	1,5	3	1,5
3	120	2	4	2
4	150	3	5	2

CLICHÉ SAF

SOUDAGE TIG MANUEL

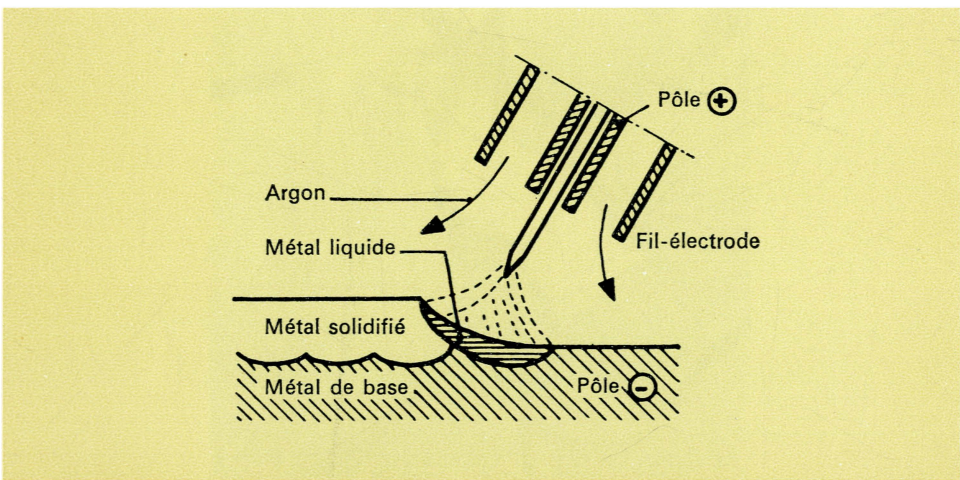
3 - PROCÉDÉ MIG (Metal Inert Gas)

L'arc jaillit entre le métal de base et le métal d'apport, fil fusible nu en acier inoxydable qui constitue par conséquent une électrode consommable. Le fil est amené et maintenu par un pistolet qui dirige également un jet d'argon protecteur (ou mieux un mélange argon-hélium). Ce procédé est rapide, d'un rendement nettement plus élevé que le procédé TIG.

La polarité est inverse (+ à l'électrode). Le procédé peut s'appliquer manuellement (on l'appelle alors « semi-automatique ») ou automatiquement. Deux réglages d'intensité sont possibles. Le procédé, à forte intensité, projette dans le bain un métal fondu « en gouttes fines » et provoque un échauffement intense du joint. Il faut lui préférer le procédé à faible intensité « en grosses gouttes » dit en « court-circuit intermittent », beaucoup moins chaud et applicable en toutes positions contrairement au précédent. Les cordons, assez bombés, sont parfois gênants lorsqu'on exige un arasement ultérieur (appareils alimentaires ou nucléaires par exemple).

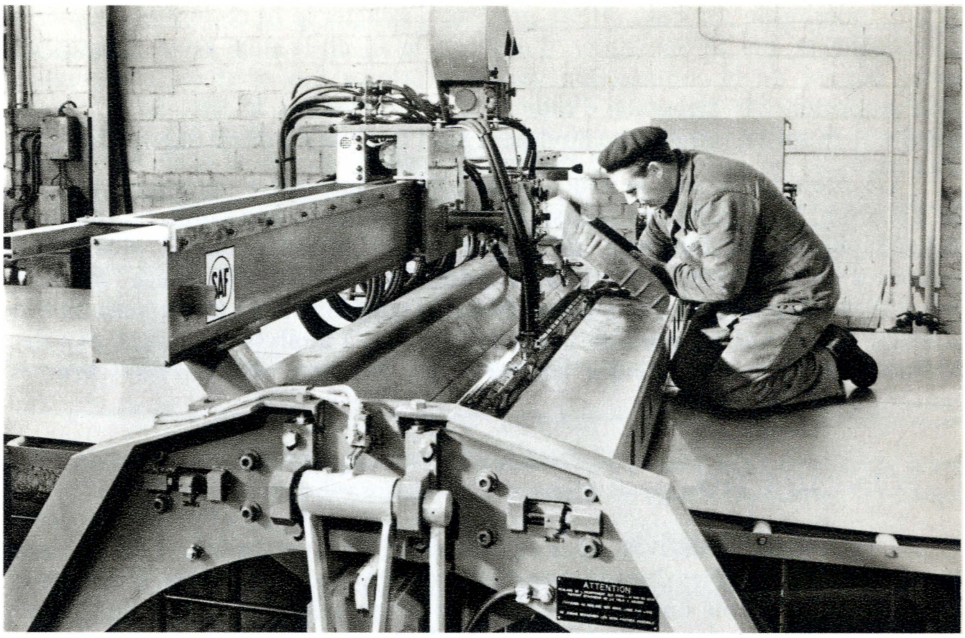
Les densités de courant sont élevées dans le MIG classique en gouttes fines, on l'utilise donc surtout pour souder les tôles d'épaisseurs moyennes (3 à 5 mm) et fortes (25 mm). On emploie des fils de faibles diamètres (1,6 - 1,2 - 0,8 mm) conditionnés spécialement sur des tourets d'environ 10 kg.

Toutes nos nuances d'apport sont utilisables; nous avons été cependant amenés à créer, pour limiter les risques de fissuration à chaud, deux nouvelles nuances à tendance ferritique un peu supérieure à celle de l'Uginarc 23 S et de l'Uginarc MKS : il s'agit de nos nuances Uginarc 23 S 1 et Uginarc MKS 1 à bas carbone (C $\leqslant$ 0,030) conduisant à des dépôts dont la teneur en ferrite est de 10 % environ.



PRINCIPE DU PROCÉDÉ MIG

CLICHÉ SAF L'AIR LIQUIDE



MONTAGE DE SOUDAGE MIXTE, SOIT TIG SOIT AU PLASMA

4 - SOUDAGE SOUS FLUX SOLIDE

Ce procédé utilise comme électrode un fil fusible nu, comme le procédé MIG, mais avec protection d'un laitier obtenu par fusion d'une poudre constituant le flux qui est disposé sur le joint à souder. C'est le procédé de haute productivité par excellence, mais il n'est applicable qu'à plat et en soudage automatique. Il provoque des échauffements notables pouvant parfois donner des cordons à structure grossière. Il est préférable de ne pas araser ces cordons. Ce procédé entraîne aussi des tensions de retrait assez importantes.

Comme il s'agit de déposer par la fusion un acier de composition définie, l'analyse du métal fondu peut résulter :

— soit entièrement de celle du fil d'apport utilisé; le flux ne joue alors que le rôle d'une simple protection du métal fondu contre l'oxydation par l'atmosphère; le flux est alors dit « neutre »,

— soit d'une compensation par le flux à partir d'un fil d'une certaine composition dont l'analyse est corrigée par l'addition d'éléments contenus dans le flux; dans ce dernier cas, un flux donné doit être associé à un fil donné pour l'obtention de l'analyse recherchée.

Il faut préférer les flux basiques aux flux acides, ces derniers rendant plus probables les pertes en éléments d'alliage oxydables et favorisant l'hydrogé-

nation indésirable du bain. Il est prudent d'acheter le fil et le flux au même fournisseur et de lui demander d'associer le fil et le flux pour donner un métal déposé de la composition voulue. Certains flux sont en effet prévus pour apporter des éléments d'alliage complémentaires à ceux du fil, alors que d'autres sont neutres et ne modifient pas l'analyse du métal déposé par le fil.

Ce procédé permet le soudage de tôles d'épaisseurs variables, à partir de 2 à 3 mm. Il entraîne une vitesse de refroidissement assez faible : d'où, dans le soudage des austénitiques, un risque de fissuration à chaud plus grand qu'avec d'autres procédés. On préférera donc les nuances à tendance ferritique non nulle : Uginarc 23 S et Uginarc MKS; Uginarc MKS 1 et Uginarc 23 S 1, Uginarc R 17. On ne modifie généralement pas l'analyse du dépôt par des additions dans le flux. Seules les pertes en éléments scorifiables (chrome) peuvent être compensées.

5 - POINTAGE TIG

Des appareils dérivés de l'équipement TIG permettent l'assemblage par points de deux tôles dont l'une est en recouvrement sur l'autre. Ce procédé élégant est applicable en traversée de tôles jusqu'à 2 ou 2,5 mm d'épaisseur et devient de mise en œuvre délicate au-delà.

6 - SOUDAGE PAR RÉSISTANCE

Le soudage par résistance (par points, à la molette, par étincelage, par bossage, etc.) est applicable sans restriction aux aciers ferritiques et austénitiques. Du fait des propriétés électriques, thermiques et mécaniques des aciers inoxydables, le soudage par points appelle un réglage différent de celui qui est valable pour l'acier ordinaire. L'énergie des impulsions électriques doit être réduite alors que les efforts mécaniques d'accostage et de « forgeage » doivent être accrus. En fait, le soudage par résistance est surtout utilisé pour la fixation des pièces annexes des appareils chaudronnés.

Les avantages de ce type de soudure sont nombreux :

a) altération structurale très faible du métal voisin de la soudure, en raison du caractère presque instantané de l'opération et, par suite, possibilité de souder des tôles à haute résistance mécanique avec une chute minimum de cette résistance au voisinage du joint,

b) oxydation superficielle très faible lorsque le courant est correctement réglé et que tout excès éventuel de chaleur est éliminé par un dispositif de refroidissement convenable (soudage sous courant d'eau), avec possibilité de décapage très rapide, soit local, soit général,

c) relief minime des points de soudure, ce relief pouvant éventuellement être éliminé par l'utilisation d'une électrode plate pour l'une des faces à souder,

d) possibilité de souder aisément entre eux des aciers de compositions différentes.

Nous donnons ci-dessous, à titre indicatif, les valeurs comparées, pour l'acier doux et l'acier inoxydable type 18-10, des intensités, pressions et durées de passage, dans le cas du soudage par points de deux tôles de 10/10 de mm.

	I (A)	P (kg)	t en périodes pour un courant de 50 cycles/sec.
Acier doux.....	9.000	250	7
Acier inoxydable type 18-10	6.500	350	6

Les réglages étant en général plus précis que pour l'acier ordinaire, il est recommandé d'employer des machines à contrôle de temps électrique, les temps étant en effet très courts.

Nota : Rappelons que le soudage par points ou à la molette n'est guère utilisé en chaudronnerie.

7 - BRASAGE A L'ARGENT

Le brasage à l'argent donne des joints mécaniquement résistants; il peut être employé quelquefois en chaudronnerie dans des cas bien spécifiques. Le meilleur joint par brasage est celui travaillant en traction dans un plan parallèle au plan des surfaces brasées.

Il existe de nombreuses compositions de soudure et de flux sur le marché et l'on doit demander au fabricant toutes les indications sur le choix du meilleur matériel pour une application donnée. Pour les travaux délicats, exigeant des joints résistants et une couleur blanche, il est avantageux de choisir des brasures à haute teneur en argent dont le point de fusion se situe au-dessous de 750-800 °C.

En ce qui concerne l'opération elle-même, il est bon, comme pour le soudage autogène, de fixer solidement les pièces à assembler et de les poser sur des barres de refroidissement. Il est conseillé d'abraser les régions à assembler. La chaleur est fournie par le chalumeau à gaz ou oxyacétylénique; le flux est appliqué et la soudure déposée aussitôt que le métal est à température correcte. L'on élimine ensuite soigneusement toute trace de flux mécaniquement ou à l'aide d'un jet de vapeur.

Il convient de veiller à ne pas surchauffer la pièce à souder, ce qui peut arriver très facilement avec un chalumeau. Par ailleurs, l'opération doit être conduite très rapidement car l'acier inoxydable se trouve porté dans le domaine de température critique 600-800 °C. L'on peut également, comme pour la soudure autogène, utiliser des qualités « stabilisées ».

Nota :

1°) Il faut en tout cas éviter absolument tout brasage au cuivre des aciers austénitiques, qui entraîne des fissurations.

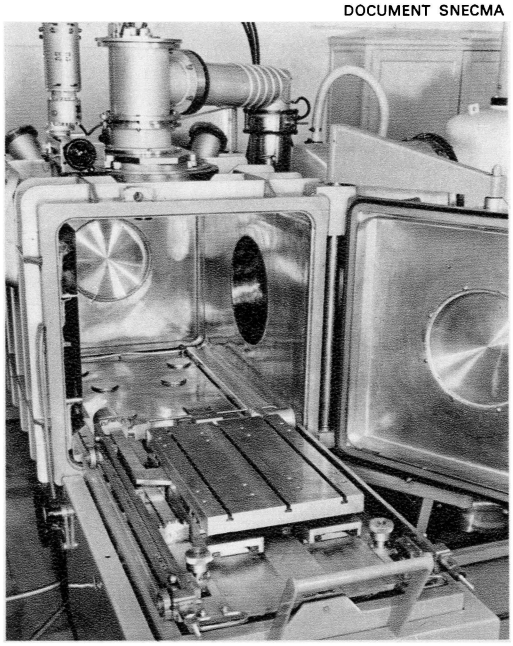
2°) Le brasage des aciers inoxydables avec des alliages étain-plomb est à mentionner, bien qu'il ne soit que très rarement utilisé en chaudronnerie. On conseillera l'emploi d'un alliage à 50 % d'étain et le décapage à l'acide orthophosphorique commercial dilué à raison d'une partie d'acide pour une partie d'eau.

8 - TENDANCES NOUVELLES

Le soudage par bombardement électronique n'est utilisé que dans des cas très spéciaux, comme l'assemblage de zones inaccessibles dans des moteurs d'avion.

Par contre, le soudage au plasma, actuellement à ses débuts, ouvre des horizons intéressants pour les aciers inoxydables. Il semble conduire à des zones affectées par la chaleur, assez étroites. Il permettra aussi, probablement, d'accroître les épaisseurs soudables sans chanfreins, apportant ainsi une bonne solution au problème embarrassant pour le chaudronnier de la préparation des épaisseurs voisines de 3 à 7 mm.

DOCUMENT SNECMA



MACHINE DE SOUDAGE PAR
BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

Chapitre XVI

OPÉRATIONS DE FINITION

1 - DÉCAPAGE DES CORDONS DE SOUDURE

Le rôle des agents de protection, flux solide ou gazeux, est toutefois insuffisant pour interdire l'oxydation des surfaces chaudes en cours de refroidissement (cordons de soudure et zones voisines).

La couche d'oxydes superficiels formée est une zone sujette à corrosions et elle doit être éliminée. Différentes méthodes peuvent être employées :

a) Les procédés mécaniques sont parfaitement convenables : soit meulage, soit sablage ou grenaillage (introduction de contraintes de compression neutralisant l'effet des tensions résiduelles de soudure), ou encore brossage avec des brosses en acier inoxydable.

b) On peut utiliser des pâtes décapantes spécialement étudiées à cet effet qui sont appliquées au moyen de brosses (à fils de nylon par exemple).

c) Lorsqu'il s'agit de décaper dans des anfractuosités ou des zones d'accès peu commodes, on peut effectuer un décapage chimique local en appliquant au moyen d'un chiffon ou d'une brosse la préparation ci-après. C'est un procédé couramment employé.

- Acide chlorhydrique 22° Bé ..... 45 %
- Acide nitrique 36° Bé ..... 5 %
- Eau ..... 50 %

d) Dans le cas où les appareils sont de petites dimensions et peuvent être immergés dans des bacs, on peut les plonger à la température ambiante dans une solution fluonitrique, qui agit comme acide, ayant la composition suivante :

— pour les aciers ferritiques :

- Acide nitrique (36° Bé) 10 % et acide fluorhydrique (à 65 %) 1 %.

— pour les aciers austénitiques :

- Acide nitrique (36° Bé) 10 % et acide fluorhydrique (à 65 %) 2 %.

Tout décapage chimique fait avec des pâtes ou à l'aide de solutions acides, limité au temps juste nécessaire à la dissolution des oxydes, doit être suivi d'un rinçage soigné et abondant. Il est conseillé de procéder ensuite après tout décapage à la passivation des appareils comme indiqué ci-après.

2 - PASSIVATION - DÉCONTAMINATION

Le maximum de résistance à la corrosion est obtenu lorsque les surfaces sont parfaitement passivées et exemptes de toute contamination génératrice de corrosion (particules ferreuses ou incrustations diverses).

Passivation

C'est une opération qui a pour but de constituer ou de reconstituer le film de passivité. On sait que ce film se forme spontanément au contact de l'air et qu'il se reforme dans les mêmes conditions s'il a été partiellement ou totalement détruit au cours d'une opération mécanique (usinage, abrasion) ou chimique (décapage).

On peut cependant, après destruction du film passif, faciliter sa reconstitution par immersion dans un bain froid d'acide nitrique 36° Bé dilué à 20 %, qui agit comme oxydant. Cette opération est conseillée après un décapage fluonitrique.

Décontamination

La contamination d'une surface entraîne la présence de particules superficielles susceptibles de déterminer ou de hâter l'évolution de phénomènes de corrosion généralement locaux; il faut les éliminer par dissolution.

Il est donc utile de rendre aux surfaces leur homogénéité, qu'elles peuvent par exemple perdre durant les opérations de conformation, en procédant à cette décontamination dont l'origine est le plus souvent ferreuse.

Pour ce faire, on immerge les pièces en fin de fabrication dans une solution d'acide nitrique 36° Bé à 25 % à la température ambiante. La durée d'immersion est difficile à déterminer exactement parce qu'elle dépend de la masse de décontamination à dissoudre ainsi que des surfaces de contact qu'elle offre. Cette opération à l'acide nitrique n'altérant pas les états de surface, l'opération peut être prolongée sans aucun inconvénient. Elle réalise en même temps la passivation. S'il y a eu antérieurement décapage, il y a eu automatiquement décontamination, et une nouvelle opération est inutile.

Dans les deux cas, passivation et décontamination, il faut :

— avant l'opération, dégraisser soigneusement la pièce,

— après l'opération, faire un rinçage abondant.

3 - TRAITEMENTS THERMIQUES DE L'APPAREIL CHAUDRONNÉ

Par un choix judicieux des aciers austénitiques, en prenant par exemple ceux stabilisés au titane ou mieux à bas carbone ($C \leqslant 0{,}03\ \%$), on peut dans presque tous les cas se passer d'un traitement thermique final des constructions réalisées avec ces aciers.

Cependant, en raison de la conductibilité thermique faible, du coefficient de dilatation élevé et de la bonne résistance mécanique à haute température

de ces aciers austénitiques, les soudures sous forte épaisseur peuvent être le siège de contraintes internes élevées qui viennent s'ajouter aux contraintes normales prévues en service. Dans certains cas, il est possible d'envisager un traitement thermique de relaxation des contraintes, dont les modalités doivent être soigneusement mises au point en fonction de la nuance d'acier inoxydable et de la géométrie des pièces. Notre Centre Technique est à la disposition des constructeurs pour donner à ce sujet tous les conseils désirables.

Les constructions en acier ferritique voient la résilience de leurs joints accrue par un recuit à 800 °C.

Les constructions en acier martensitique doivent être recuites ou encore traitées par trempe et revenu après soudage final.

4 - MEULAGE - POLISSAGE

a) S'il est assez rare que le meulage de l'acier inoxydable soit nécessaire, il est, par contre, souvent utile de meuler les cordons de soudure :

— soit en vue de respecter des cotes de montage,

— soit pour des raisons d'aspect et de présentation,

— soit plus fréquemment pour permettre le nettoyage facile des appareils ou éviter l'accumulation des salissures et d'agents de contamination. C'est principalement dans ce cas qu'il améliore la résistance à la corrosion à condition d'obtenir après meulage des surfaces régulières exemptes d'anfractuosités et de rayures grossières.

On utilisera les meules habituelles du commerce, par exemple :

Opération	Meule	Grain	Vitesse périphérique
Dégrossissage.....	Carborundum	20 à 30	1.500-1.800 m/mn
Finition.....	Corindon blanc	50 à 100	2.000 m/mn

Il est en tout cas impératif de choisir des **abrasifs complètement exempts de fer.**

b) Justifié par certains emplois des appareils ou favorisant la résistance à certaines formes de corrosions, le polissage est une opération coûteuse à laquelle il faut avoir réfléchi dès la conception de l'appareil. Le coût peut en être réduit par le choix des tôles prépolies et par préservation de cet état de surface au cours des manutentions et des opérations de fabrication.

La gamme de polissage dépendra de l'état initial et de l'état final recherché et pourra impliquer successivement la mise en œuvre d'opérations de bufflage (corindon à grain 180 - corindon à grain 220/320), de brossage Tampico ou Cisal/alumine ou vert de chrome et d'avivage au disque feutre avec les mêmes abrasifs.

Chapitre XVII

USINAGE DES ACIERS INOXYDABLES

Les entreprises de chaudronnerie disposent souvent d'un atelier de mécanique, où s'usinent arbres, axes, pièces diverses devant s'adapter sur la construction chaudronnée proprement dite.

Nous pouvons livrer, même en petites quantités, toutes les nuances classiques d'aciers inoxydables, en barres rondes ou hexagonales. A côté des nuances traditionnelles (P 12 à 13 % de chrome, NS 22 S et NSM 21 S) existent des variantes à usinabilité améliorée qui permettent des gains appréciables sur les vitesses de coupe et l'usure des outils : F 12 S à 13 % de chrome trempant, F 17 S à 17 % de chrome et NSU du type 18-10.

Les principales présentations sont les barres laminées ou écroûtées, calibrées, meulées, rectifiées (ordre des tolérances décroissantes). Dans les trois dernières présentations, des variantes polies, à faible rugosité, peuvent être fournies; leur emploi permet de réduire l'usure ou le coefficient de frottement des contacts mobiles.

L'usinage proprement dit s'exécute, pour les aciers martensitiques et ferritiques traditionnels, à peu près dans les mêmes conditions que les aciers de construction courants de même dureté. Il faut simplement diminuer légèrement les vitesses de coupe si l'on désire des durées normales de travail entre réaffûtages.

L'usinage des aciers austénitiques est plus délicat : ils ont une ductilité élevée, une faible limite élastique, une forte aptitude à l'écrouissage sous le travail de l'outil et un faible coefficient de conductibilité thermique; on cherchera à réduire l'écrouissage en diminuant le nombre de passes, donc en augmentant la profondeur de passe, quitte à réduire l'avance et la vitesse de coupe. Si l'on utilise un liquide de coupe, il faut veiller à ce que le jet arrose régulièrement les parties les plus chaudes de l'outil.

Il est difficile d'indiquer en valeur absolue des vitesses de coupe à conseiller pour chaque nuance, car les conditions d'usinage dépendent des machines-outils utilisées, des huiles de coupe, du dessin de la pièce elle-même.

Il est cependant possible de donner des indications relatives : on définit l'indice d'usinabilité d'une nuance par un coefficient qui représente la réduction de vitesse de coupe pour cette nuance par rapport à celle d'un acier de référence (dans les mêmes conditions d'usinage). L'acier de référence, indice 100, est un acier non allié, resulfuré à 0,1 % de carbone, d'une dureté Brinell de 200 environ).

Cependant, on peut classer en familles les aciers inoxydables qui, se comportant à peu près de la même façon, ont le même indice d'usinabilité.

Nous pouvons alors dresser le tableau ci-après, établi pour une opération de chariotage avec outils en acier rapide, sur des aciers étirés à froid.

FA-MILLE	NUANCES UGINE	INDICE %	FA-MILLE	NUANCES UGINE	INDICE %
0	ASTM B 1112	100	6	NS 24-NS 30-NS 31 S-NSM 21 - NSM 22 S - NSM 23 - NSMC*	39
1	F 17 S	87			
2	F 12 S	85	7	FIA - FI - U12 - P12 - S12	55
3	NSU	60	8	FLUGINOX 65 - FLUGINOX 71	36
4	F 17	57	9	R 17	33
5	NS 21 AS - NS 21 A - NS 20 P - NS 22 S - NS 21 P - NS 21 C - NS 95	44	10	NSPF 3	35

* *La présence de titane ou de niobium peut accélérer quelque peu l'usure des outils.*

Nota : Ces indices sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatif, on pourra commencer à travailler sur ces bases, quitte à corriger les vitesses de coupe en fonction des résultats obtenus.

En particulier, pour d'autres opérations d'usinage, ou pour d'autres états du métal, les indices peuvent être différents et même améliorés.

Outils et liquides de coupe

Des rendements convenables ne peuvent être obtenus qu'avec des outils en acier rapide ou des outils à plaquette de carbure.

En ce qui concerne les liquides de coupe, nous conseillons de s'adresser aux fabricants qui, connaissant bien les problèmes posés par l'usinage des aciers inoxydables, fourniront dans chaque cas la solution efficace dans le but d'obtenir le meilleur rendement de l'outil et un bon état de surface.

Sur demande au Service « Documentation » de la Division "Aciers Spéciaux" d'UGINE KUHLMANN, vous recevrez des documents vous renseignant sur l'usinage des aciers inoxydables, en particulier sur les outils à utiliser.

CONCLUSION

Pour résumer les propriétés que possèdent les aciers inoxydables en regard de la mise en œuvre en construction chaudronnée, précisons que l'intérêt de leur utilisation résulte de ce qu'ils possèdent :

1° - l'inoxydabilité, qui doit être conservée ou rétablie, en cas d'altération des surfaces,

2° - des caractéristiques mécaniques relativement élevées et l'écrouissabilité ; cependant, il faut un matériel de conformation puissant pour le formage,

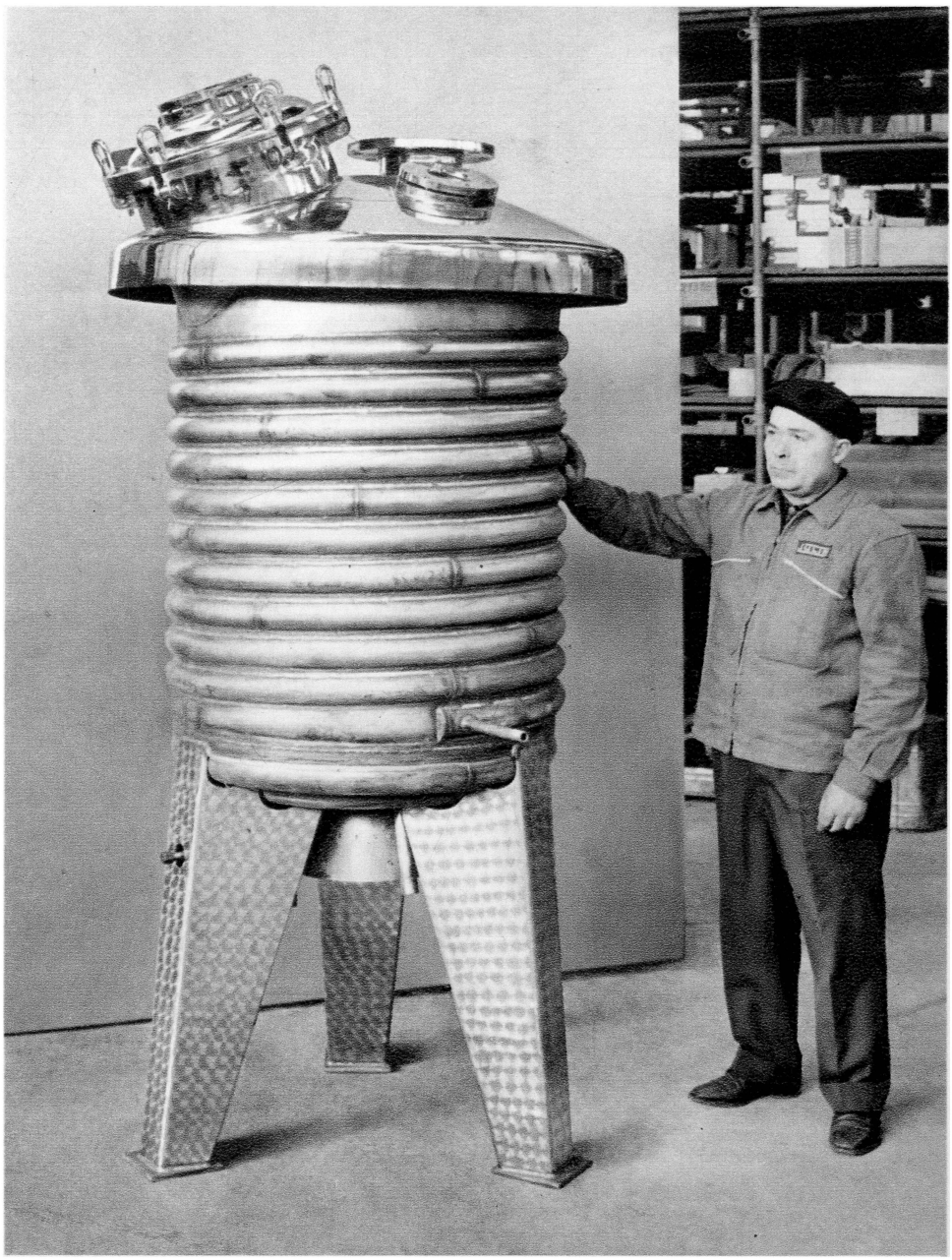
3° - des propriétés physiques intéressantes du fait de leur coefficient de dilatation, mais les conductibilités thermiques et électriques ont une incidence sur la conception, le soudage, les paramètres opératoires,

4° - une bonne aptitude au formage,

5° - une certaine aptitude au soudage, qui est excellente, en ce qui concerne les aciers austénitiques.

Il s'ensuit donc que la mise en œuvre des aciers inoxydables en chaudronnerie fait appel aux techniques et aux équipements courants dans la profession. C'est bien plus par les soins dont il sait entourer ses opérations que se distingue le chaudronnier spécialiste des aciers inoxydables.

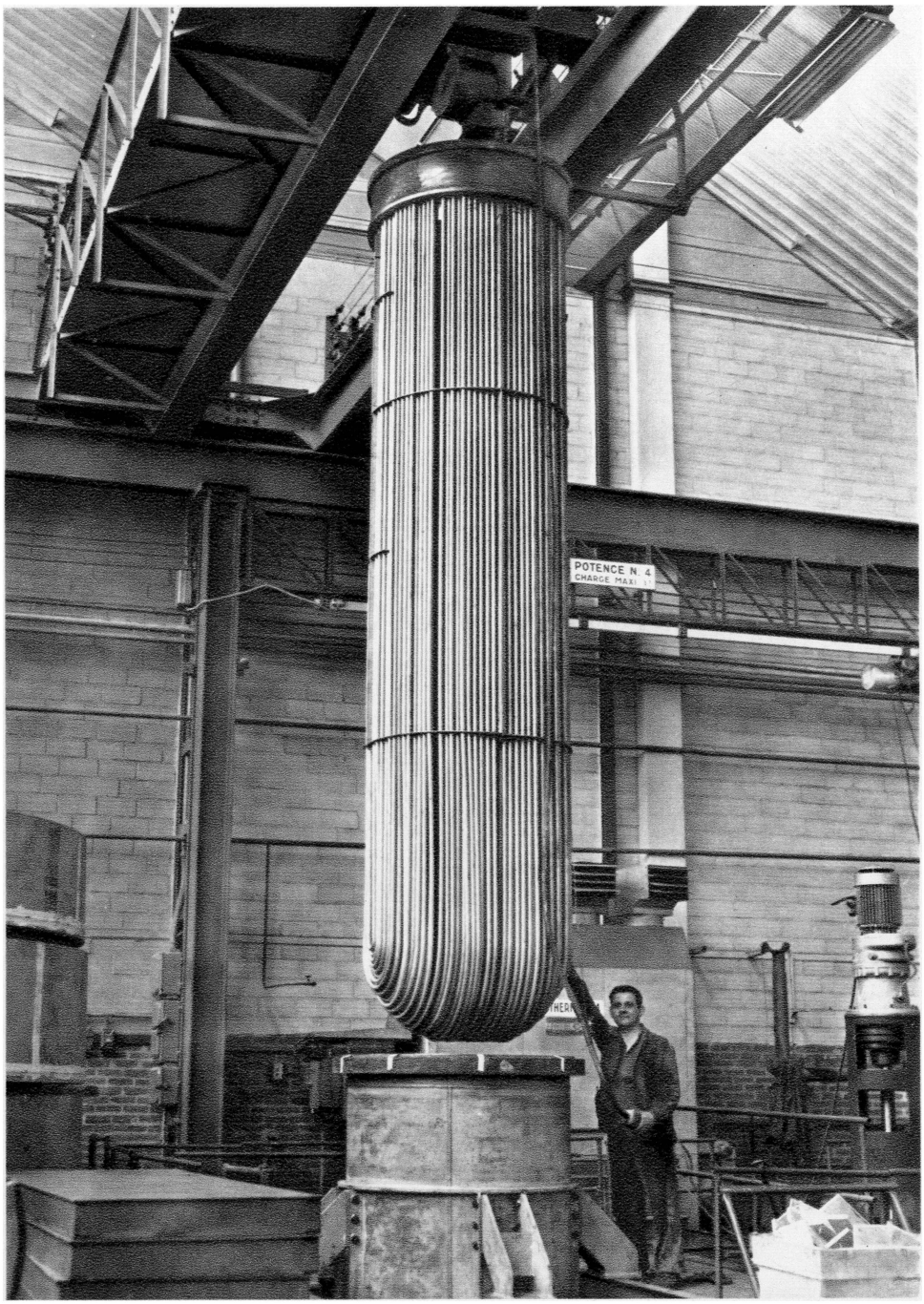
Travail noble, la construction des appareils chaudronnés inoxydables gagne, quand c'est possible, à être exécutée à l'écart des fabrications ordinaires et par un personnel stable, familiarisé avec le climat de soins et de propreté qui doit régner dans l'atelier.



RÉACTEUR POUR L'INDUSTRIE PHARMACEUTIQUE
. ACIER 18-10 (NS 22 S) POLI

Quatrième partie

CONCEPTION DES APPAREILS CHAUDRONNÉS EN ACIER INOXYDABLE



ÉCHANGEUR DE CHALEUR
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Chapitre XVIII

CHOIX DE L'ACIER

1 - LES CRITÈRES DU CHOIX

Le problème de la sélection d'une nuance d'acier inoxydable est souvent abordé sous le seul angle de la résistance à la corrosion par le milieu ambiant, critère le plus fréquent, mais qui n'est pas le seul à prendre en considération.

En effet, les propriétés physiques des aciers, leur comportement mécanique, n'entrent pas seulement en ligne de compte lors du calcul des pièces; ils peuvent être déterminants pour le choix d'une nuance. Il convient donc de préciser l'influence de trois critères moins fréquents mais qui n'en sont pas pour autant mineurs :

— propriétés physiques,

— comportement mécanique,

— pollution des produits,

avant de passer au critère de corrosion, qui mérite un examen plus approfondi.

2 - INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les propriétés physiques des principales catégories d'aciers inoxydables ont été indiquées au chapitre IX page 55 et sont chiffrées de façon plus détaillée dans les notices techniques se rapportant à chaque nuance, en particulier en fonction de la température.

Ces propriétés peuvent être un critère absolu de choix ou n'en constituer qu'un élément second.

On connaît des cas où la perméabilité magnétique, l'amagnétisme sont des impératifs catégoriques, alors que la résistance à la corrosion ne pose pas de problème fondamental.

Dans le domaine des hautes températures, vers 1 100 °C par exemple, on pourra préférer la nuance UGINE FLUGINOX N 25, car son coefficient de dilatation est plus faible que celui de telle autre nuance plus courante et elle présente en plus un meilleur comportement au choc thermique.

Il n'est pas impossible qu'on soit amené à utiliser un acier ferritique pour sa conductibilité thermique et à faire ainsi quelque concession sur sa résistance à la corrosion.

3 - INFLUENCE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE

Dans le domaine des hautes températures, ce sont les caractéristiques de résistance-fluage qui dictent en premier le choix d'une nuance. Aux limites d'emploi, ce sont ces seules caractéristiques qui permettront de prendre une décision et la résistance à la corrosion par le milieu ambiant ne peut que découler de la composition et du traitement du métal.

Certaines pièces d'un appareil chaudronné peuvent être soumises à des contraintes élevées, soit accidentellement, soit en service normal; ce sont, par exemple, des ajutages, des organes de liaison ou des pièces destinées à la manipulation des appareils. Ces pièces, au surplus, peuvent être de formes complexes, nécessitant des travaux d'usinage plus ou moins poussés et délicats. On est alors amené à considérer l'emploi d'un acier martensitique au soufre (nuance F 12 S) susceptible de traitement thermique après usinage. La moindre résistance de cet acier à la corrosion sera compensée soit par des surépaisseurs convenables, soit par des chemisages intérieurs ou extérieurs, constitués d'aciers adéquats non soumis à des sollicitations mécaniques importantes.

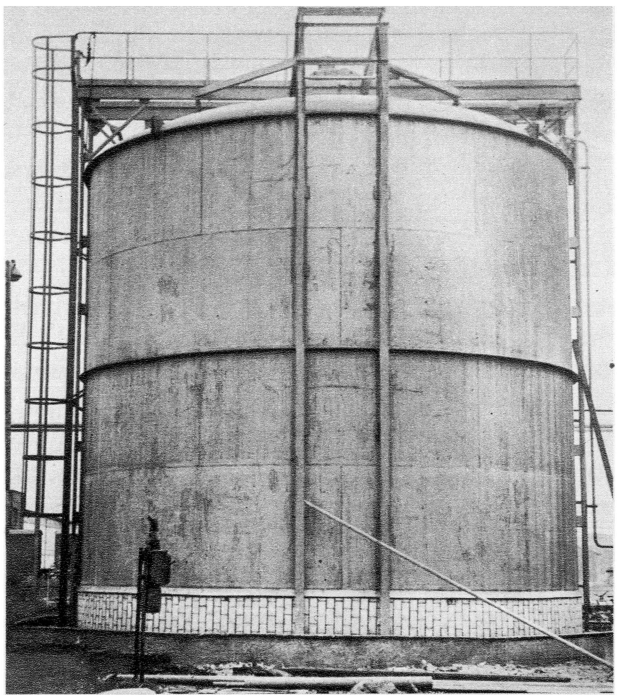
Un autre cas intéressant est celui où une pièce est soumise à des sollicitations alternées de faible amplitude, mais de fréquence élevée : c'est le cas, par exemple, des membranes de pompes à gaz. C'est alors la limite de fatigue qui décidera, en premier, du choix de la nuance et de son état de livraison, et il est bon de rappeler ici qu'un acier du type NS 20 E (C 0,10, Cr 18, Ni 7,5) présente, à l'état hypertrempé, une limite de fatigue plus élevée que celle d'un acier du type NS 22 S, à très bas carbone ($C \leqslant 0{,}03$, Cr 18, Ni 9) et que cette limite dans le premier cas augmente rapidement avec un léger écrouissage, alors qu'elle est à peu près stable dans le second.

4 - POLLUTION ET DÉTÉRIORATION DES PRODUITS

Il arrive que l'on se trouve en face de critères à caractère négatif. Ce sont les cas où, sans qu'il y ait de corrosion marquée, certains aciers ou certaines phases des constituants de l'acier ont un effet néfaste sur les produits circulant dans les appareils.

Citons par exemple les appareils destinés au stockage des vins et de certains jus de fruits. La corrosion d'un acier à 17 % de chrome, tel que F 17, est dans ce cas de l'ordre du millimètre d'épaisseur en mille ans. Elle est négligeable, suivant les critères habituels. Il suffit, pourtant, de quelque temps pour que le goût des vins soit dénaturé par cet acier, le phénomène étant connu sous le nom de « casse ferrique ». L'utilisation d'aciers austénitiques est alors obligatoire.

Des cas similaires peuvent être cités, principalement dans les industries pharmaceutique et photographique, où la pollution des produits traités doit être réduite dans toute la mesure du possible.



RÉSERVOIR DE STOCKAGE D'ACIDE PHOSPHORIQUE
ACIER 18-12 Mo (NSM 22 S)

5 - INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE A LA CORROSION

La résistance à la corrosion est le critère le plus fréquent du choix d'une nuance. Le problème est d'autant plus difficile à résoudre que son énoncé est plus vague et que les antériorités sont moins nombreuses.

a) **Reconduction ou modifications d'installations existantes.**

Le cas le plus simple est évidemment celui où une unité nouvelle est identique à une autre unité déjà en fonctionnement. On pourra reconduire purement et simplement les choix antérieurement faits, mais on devra s'assurer que toutes les conditions premières sont absolument identiques dans les deux cas.

Il n'est pas indifférent, par exemple, de changer de fournisseur d'acide sulfurique, alors que concentration, température, pression, etc., seraient les mêmes; on sait, en effet, que l'acide des chambres de plomb contient, outre de l'arsenic, environ 0,5 % d'acide nitrique qui a un effet inhibiteur sur l'action corrosive de l'acide sulfurique.

En fait, dans la plupart des cas, il y aura modification des installations et il conviendra d'apprécier l'influence éventuelle de ces modifications. Une élévation de température, apparemment peu importante, pourra quelquefois provoquer l'apparition de corrosion sous tension en aval de la cellule où la température a été augmentée. Elle pourra aussi activer une corrosion générale qu'on croyait maîtriser.

b) **Installations-pilotes.**

Il est assez fréquent que le passage entre l'expérimentation de recherche et la production industrielle normale se fasse par le canal d'une installation pilote qu'on modifie et retouche jusqu'à obtenir satisfaction.

La conception de l'installation définitive ne saurait se faire en se bornant à changer l'échelle des appareils. On prendra en considération, entre autres, les nouveaux rapports de surface entre les tôles et les cordons de soudure.

Il conviendra encore de penser qu'une unité industrielle est faite pour fonctionner plus longtemps qu'une unité-pilote et ne doit pas subir d'arrêts, toujours coûteux. Ainsi certains phénomènes d'entartrage, qui n'étaient pas apparus auparavant, peuvent se manifester en provoquant des corrosions qu'on n'avait pu constater au stade de l'unité-pilote.

Les paramètres physiques, tels que vitesse de circulation, pression, viscosité, masse volumique... jouent un rôle. Comme il n'existe pas de lois de similitude en mécanique des fluides, les essais sur maquette ne peuvent donner que des résultats approchés.

c) **Installations nouvelles.**

C'est le cas le plus général; il est alors nécessaire que **l'utilisateur final fournisse le plus grand nombre d'informations possibles et que s'instaure une collaboration étroite entre le chaudronnier constructeur et l'aciériste fournisseur.** Les problèmes sont trop souvent imparfaitement posés et il n'est pas rare que l'utilisateur soit porté à trop de discrétion, quant aux conditions opératoires et aux opérations annexes, telles que chargement-déchargement et entretien.

En admettant qu'on puisse définir le milieu ambiant en contact avec l'appareil avec exactitude, et dans le détail, les conditions de fonctionnement et tous les paramètres chimiques, physiques, thermodynamiques, il existe des cas où l'on peut préjuger de ce qui peut se passer, c'est-à-dire dégrossir la solution.

C'est d'abord le cas des milieux aqueux aux températures modérées, qu'on sait maintenant appréhender avec exactitude grâce aux mesures potentiométriques devenues presque classiques et que le Centre de Recherches

Métallurgiques d'UGINE a considérablement développées. Elles permettent d'apprécier non seulement l'influence des éléments d'alliage, mais encore celle des états de surface. Elles donnent également la possibilité de mesurer l'effet des impuretés du milieu ambiant, celui de son vieillissement, celui des inhibiteurs éventuels, etc.

Pour les milieux visqueux ou gazeux, aux températures moyennes et élevées, le métallurgiste dispose d'un très grand nombre d'informations qui, convenablement utilisées, permettent très souvent de donner une réponse définitive aux problèmes posés. A défaut, elles conduisent à limiter l'expérimentation complémentaire.

Moins on dispose de moyens pour ébaucher la solution d'un problème, plus longue et délicate en sera l'étude qui nécessite, dans tous les cas, le maximum de renseignements. Ce dernier point est suffisamment important pour que nous énoncions les grands groupes de données qu'il est absolument nécessaire de posséder avec précision :

Milieu corrodant :

- Composants principaux et secondaires,
- Variations éventuelles de ces composants au cours de réactions secondaires,
- Teneur en impuretés,
- Pression et ses variations (dégagement éventuel de gaz dissous),
- Température,
- Aération,
- Vitesse de circulation (circulation continue ou non), possibilités de cavitation,
- Possibilités de condensation,
- Agitation permanente ou temporaire,
- pH, potentiel redox,
- Érosion, abrasion,
- Nombre de phases simultanément en présence (par exemple : liquide-vapeur),
- Cycles thermiques des composants,
- Conditions thermodynamiques extrêmes, pouvant éventuellement se manifester (par exemple : possibilité d'ébullition ou de condensation dans un échangeur).

Antériorités :

- Conditions d'exploitation,
- Incidents observés,
- Motifs des arrêts.

Essais effectués :

— Essais de laboratoire en précisant les conditions, les types d'appareil et le processus d'interprétation,

— Essais in situ, en précisant les dimensions des éprouvettes, leur localisation, la durée, les cycles éventuels et la méthode d'interprétation des résultats.

Entretien :

— Raisons qui nécessitent un entretien, un nettoyage, une vidange, (périodique ou non),

— Mode opératoire envisagé, durée et fréquence.

Construction :

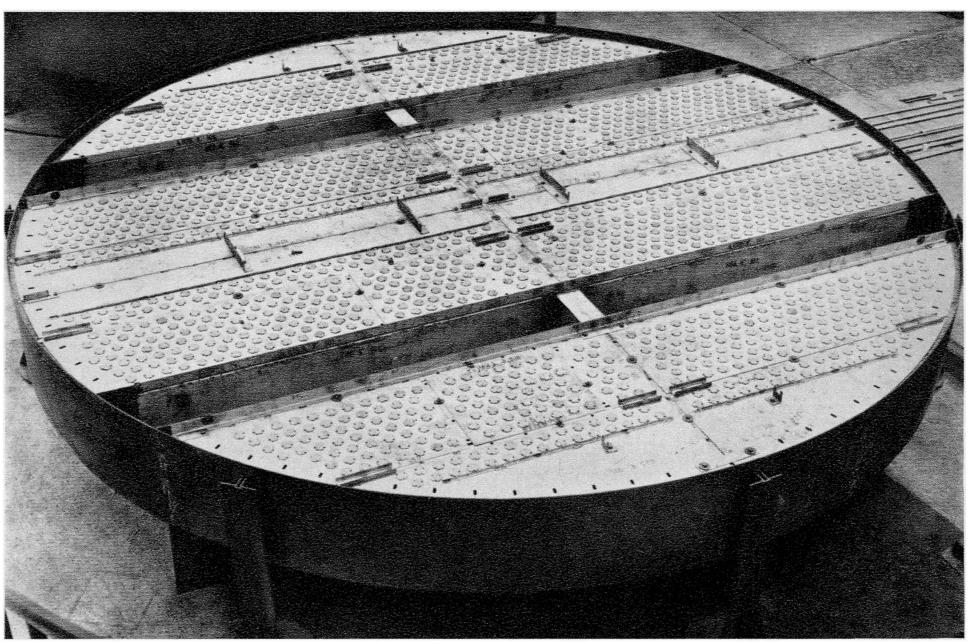
— Types de pièces à assembler,

— Épaisseurs,

— Modes d'assemblage,

— Cycles thermiques probables des parties chauffées.

Il est donc indispensable que soit dressé un inventaire de ces données dans leur ordre d'importance pour toute installation nouvelle.



PLATEAU A CLAPETS
ACIER FIA

Chapitre XIX

CALCUL ET TRACÉ DES PIÈCES

1 - PRINCIPES DE BASE ET PARAMÈTRES DU CALCUL

Dans le cadre de la réglementation française, les principes de base sont exprimés dans le décret du 2 avril 1926, complété par celui du 18 janvier 1943 et modifié par celui du 8 septembre 1967, ainsi que par les commentaires qui accompagnent ces décrets. Citons :

« Le choix des matériaux employés à la construction ou à la réparation, leur mise en œuvre, la construction des assemblages, la détermination des formes, dimensions et épaisseurs, sont laissés à l'appréciation du constructeur ou du réparateur, sous sa responsabilité. »

On a volontiers dit que dans ces conditions le constructeur porte seul la responsabilité de la sécurité des appareils. Cette assertion n'est pas entièrement justifiée, car le calcul des sections à donner aux pièces comprend des facteurs qui ne sont pas du seul jugement du constructeur.

De façon générale, les épaisseurs dérivent d'une fonction à plusieurs variables, qui peut s'exprimer, dans sa forme la plus générale, par une formule telle que :

$$e = f\ (T,\ D,\ A,\ N,\ \alpha,\ c),$$

où les symboles ont la signification suivante :

- e épaisseur des parois,
- T taux de travail prévisible dans les parois du récipient,
- D dimension transversale caractéristique, telle que diamètre,
- A position des lignes d'assemblage par rapport à la direction caractéristique de la forme, par exemple dans un cylindre l'angle des cordons de soudure et de l'axe du cylindre,
- N taux de travail admissible pour le matériau choisi,
- α coefficient de joint,
- c surépaisseur de corrosion.

Rappelons que le coefficient de joint est un coefficient de sécurité supplémentaire appliqué aux constructions soudées.

Il appartient, certes, au constructeur de rassembler toutes les informations relatives à ces divers paramètres, mais l'analyse détaillée des valeurs qu'il convient de leur donner montre que le résultat, c'est-à-dire le calcul d'épaisseurs compatibles avec la sécurité, relève de plusieurs sources :

— l'utilisateur final,
— le fournisseur des matières,
— le pouvoir réglementaire,
— le constructeur lui-même.

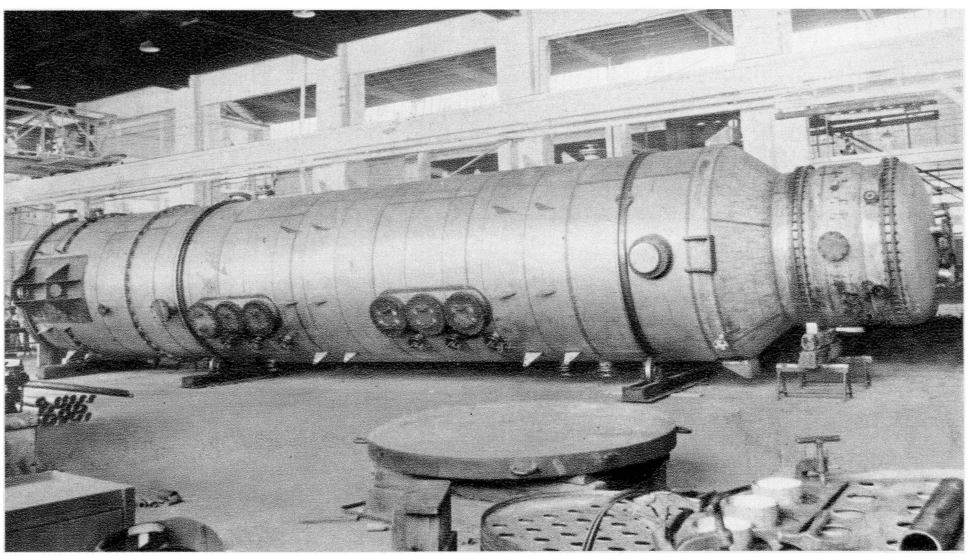
On retrouve à ce propos la nécessité, déjà exprimée au chapitre précédent, d'une collaboration intime entre les parties qui, si elle fait défaut, ne peut conduire qu'à la multiplication des coefficients de sécurité (c'est-à-dire des coefficients d'incertitude) et par voie de conséquence à une augmentation abusive des coûts de construction.

Il n'est pas utile de revenir sur les règles du calcul des récipients et des tubulures d'aciers inoxydables ou réfractaires qui se conduit suivant les prescriptions des codes en vigueur dans les différents pays et suivant celles des cahiers des charges rédigés par les Bureaux d'études des utilisateurs.

En France, le code de construction des appareils à pression non soumis à l'action de la flamme, édité en 1954, a fait l'objet d'une révision par le Syndicat National de la Chaudronnerie, de la Tôlerie et de la Tuyauterie Industrielle qui a publié dès 1966 un certain nombre de fascicules concernant les « Règles de calcul » (formules, abaques et commentaires), et a édité le volume correspondant en mars 1969.

De plus, l'édition 1967 du code américain A.S.M.E. (Section VIII) « Récipients sous pression non soumis à l'action de la flamme » a paru en langue française au début de 1968.

DOCUMENT SPEICHIM



COLONNE MONOBLOC - LONGUEUR 15,76 m
ACIER 18-10 (NS 22 S)

2 - ÉTUDE PARTICULIÈRE DU TAUX DE TRAVAIL PRÉVISIBLE T

Le taux de travail prévisible est d'abord lié à la pression P, interne ou externe, du fluide sur les parois. Il faut y ajouter tous les efforts liés à la construction proprement dite et aux conditions d'installation telles que :

- flexions ou compressions dues au poids propre,
- tensions résiduelles dues à la conformation et aux assemblages,
- réactions d'appuis et efforts dus au vent,
- contraintes relevant des procédés de transport et de montage.

Si l'on s'en tient aux calculs de membranes, l'épaisseur est proportionnelle à P et aux autres composants de T. L'expression est plus complexe pour les valeurs élevées de l'épaisseur et pour les raccordements de pièces d'épaisseurs nettement différentes.

Ainsi la détermination de T est fonction de la pression P et de facteurs technologiques. Si ces derniers doivent être appréciés par le constructeur, le niveau maximum de pression relève d'abord des intentions de l'utilisateur et de la connaissance qu'il a de son procédé, ensuite du pouvoir réglementaire qui fixe les conditions d'épreuve ou de pression maximale (timbre, par exemple).

3 - ÉTUDE PARTICULIÈRE DE LA POSITION DES LIGNES D'ASSEMBLAGE A

Le paramètre A représente essentiellement la disposition des cordons de soudure dans un assemblage. C'est un facteur essentiellement technologique, dont l'importance n'est pas négligeable. Si l'on admet en effet la valeur 1 pour des soudures disposées suivant les génératrices d'un cylindre, le multiplicateur à appliquer à d'autres formes ou à d'autres dispositions peut varier de 0,5 pour une sphère à 1,2 pour une virole conique.

Dans bon nombre de cas, le constructeur n'est pas maître du facteur A, mais il n'est pas inutile de mentionner ici son importance. Nous y reviendrons plus loin.

4 - ÉTUDE PARTICULIÈRE DU TAUX DE TRAVAIL ADMISSIBLE N

La question du taux de travail admissible est la plus importante.

Le comportement mécanique des aciers inoxydables, des aciers réfractaires et des alliages spéciaux résistant au fluage ou à la corrosion a été exposé en détail au chapitre X.

On peut en conclure que :

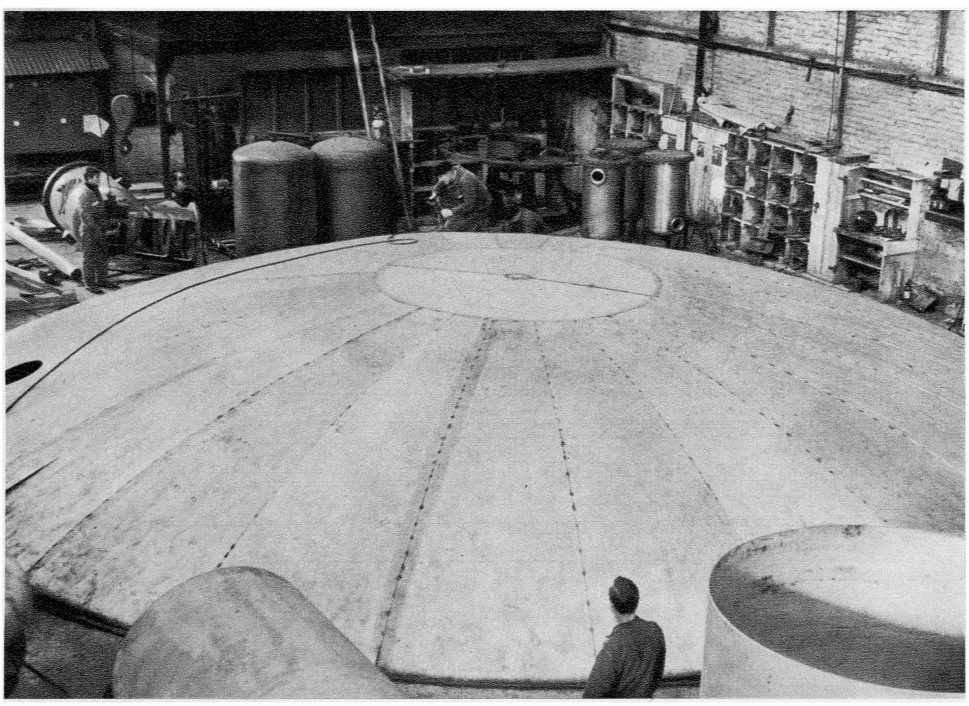
- toutes les caractéristiques mécaniques varient avec la température, s'abaissant lorsque celle-ci augmente et tendant à augmenter lorsqu'on atteint le domaine cryogénique, à l'exception de l'allongement et de la résilience;

— les aciers ferritiques et martensitiques présentent un domaine élastique vrai, limité à un point d'instabilité élastique lorsqu'on entre dans le domaine plastique;

— les aciers et alliages austénitiques, lorsqu'ils sont hypertrempés, n'ont pratiquement pas de domaine élastique: le graphique figuratif de leur comportement mécanique ne présente ni point ni zone singuliers susceptibles de provoquer une instabilité élastique; ils sont donc fiables sous toute contrainte. Après un léger écrouissage, dû aux travaux de conformation ou aux opérations d'épreuve, ils présentent un domaine élastique vrai aux tensions inférieures à la précontrainte, mais ne possèdent toujours pas de zone d'instabilité pour les tensions supérieures;

— aux températures élevées, les phénomènes de fluage deviennent prépondérants et on prend en considération :

- soit un allongement donné,
- soit la rupture au bout d'un temps donné : 1.000, 10.000 ou 100.000 heures suivant la vie probable de l'appareil.



RÉGLAGE EN ATELIER D'UN DOME
POUR RÉSERVOIR DE 1.000 m³ D'ACIDE NITRIQUE
ACIER 18-10 (NSMC)

Comme les essais ne sont que des images imparfaites de la réalité, qui ne peut donc être qu'approchée par les calculs et les mesures sur prototypes, on est amené à affecter les caractéristiques mécaniques d'un coefficient de sécurité. L'étude du facteur N se réduit ainsi au choix de la caractéristique mécanique à prendre en considération et à la détermination du coefficient de sécurité.

a) **Aciers ferritiques et martensitiques.**

Ces aciers présentant un domaine élastique vrai, les méthodes de calcul classiques peuvent leur être appliquées. On pourra choisir la limite élastique comme grandeur caractéristique et lui appliquer un coefficient diviseur compris entre 1,6 et 1,9 suivant les règlements et les codes et suivant qu'il y a ou non recette des matériaux. Ceci revient, d'ailleurs, sensiblement à adopter le coefficient 3,5 par rapport à la charge de rupture vraie.

b) **Aciers et alliages austénitiques.**

La réglementation française, telle qu'elle a été modifiée par le décret du 8 septembre 1967 et l'arrêté du 16 octobre 1967, a légitimement décidé de ne prendre en considération que la charge de rupture R **mesurée à la température d'emploi** et d'adopter, jusqu'à plus ample expérimentation, un coefficient de sécurité fixé à 3,5 sous forme de diviseur de R. Une telle décision est en plein accord avec les résultats de récents travaux qui ont démontré l'incertitude qui règne sur la mesure de $E_{0,2}$ et l'inexistence d'une quelconque zone d'instabilité élastique dans le comportement mécanique des matériaux.

c) **Aciers et alliages de fluage.**

Ce qui est exprimé ci-dessus ne vaut que pour autant que n'apparaissent pas de phénomènes de fluage. Si ceux-ci deviennent prépondérants, on prend généralement en considération les quatre valeurs suivantes :

- valeur moyenne de la charge de rupture à 100.000 heures (divisée par 1,6),
- valeur minimale de la charge de rupture à 100.000 heures (divisée par 1,28),
- valeur moyenne de la contrainte provoquant un allongement de 1 % en 100.000 heures,
- charge de rupture instantanée à la température d'emploi (divisée par 3,5),

et l'on choisit le plus faible des quatre résultats.

Il est évident cependant que l'accord peut se faire sur d'autres bases, entre le constructeur, l'utilisateur et le contrôle, suivant le but poursuivi et la construction envisagée.

5 - ÉTUDE PARTICULIÈRE DU COEFFICIENT DE JOINT α

Les essais de traction sur éprouvettes soudées montrent que dans la quasi-totalité des cas, la rupture se fait dans le métal de base. Il n'est donc pas exact d'estimer qu'un assemblage soudé est mécaniquement affaibli par les opérations de soudage. Tous les règlements, cependant, affectent N d'un coefficient de joint dont la valeur moyenne tend d'ailleurs vers l'unité, alors que deviennent plus importantes la fiabilité des matériaux, celle des techniques de soudage et celle des opérations de contrôle.

En l'état actuel des choses, le coefficient 0,8 est applicable aux aciers ferritiques et le coefficient 0,9 est accordé par le Service des Mines aux constructions de qualité, exécutées à partir d'aciers austénitiques. On se souviendra que les constructions en aciers ordinaires supposent un coefficient de joint généralement inférieur ou égal à 0,7.

6 - ÉTUDE PARTICULIÈRE DE LA SURÉPAISSEUR DE CORROSION c

La surépaisseur de corrosion a été introduite pour tenir compte des tolérances d'épaisseur et des risques de corrosion.

Les aciers inoxydables sont laminés dans des conditions telles que les tolérances d'épaisseur sont très étroites. Il n'y a donc pas lieu de tenir compte de cette incertitude.

En ce qui concerne la corrosion, tout dépend des principes qui ont présidé au choix de la nuance. **Si on a choisi une nuance dont la tenue est parfaite, il n'y a pas lieu de prévoir de surépaisseur.** Si, par contre, on a opté pour une corrosion contrôlée, il y a évidemment lieu de tenir compte du gradient de corrosion et de la vie probable du matériel construit.

7 - CAS DES PIÈCES TRAVAILLANT EN COMPRESSION

Ce qui a été dit au § 4 précédent suppose que les pièces ne travaillent qu'en traction ou compression pure. S'il y a risque de flambage, la valeur limite de N dérive d'autres considérations : c'est le cas, entre autres, des récipients soumis à pression extérieure.

Il n'est pas question d'entrer ici dans le détail des calculs, mais il est utile d'aborder le sujet, car certaines approximations, concernant par exemple le module d'élasticité, conduisent à des épaisseurs excessives et donc à des constructions inutilement coûteuses.

Rappelons que la contrainte critique est proportionnelle au module d'élasticité et au moment d'inertie de la section, et que le module d'élasticité défini par la pente de la droite qui représente le domaine élastique dans la courbe de traction (lorsqu'il existe) est donc le rapport du taux de travail N à l'allongement A unitaire.

Pour les aciers ferritiques et martensitiques, le module d'élasticité est constant dans tout le domaine élastique. Le calcul en est ainsi facilité et il suffit de reconduire les résultats acquis par l'utilisation des aciers au carbone.

Pour les aciers et alliages austénitiques, la loi de Hooke, sur la proportionnalité des effets et des forces, n'est exprimable que sous forme différentielle :

$$E_t = \frac{d\,N}{d\,A}$$

c'est-à-dire que le module d'élasticité, qui est fonction de N, est la dérivée de cette contrainte par rapport à l'allongement (module tangentiel).

Il convient alors d'introduire dans les calculs le « module réduit » de Timoschenko, qui tient compte du module tangentiel exprimé ci-dessus et du module à l'origine. Le calcul correct de la contrainte critique de flambage est ainsi plus compliqué, mais demeure possible.

8 - UTILISATION D'ACIERS ÉCROUIS

Tout ce qui précède suppose l'utilisation d'aciers adoucis ou hypertrempés, suivant leur structure, dont l'écrouissage n'est dû qu'aux opérations de conformation.

On sait que l'écrouissage préalable conduit à augmenter les caractéristiques mécaniques, donc à pouvoir alléger les structures.

En fait, ceci n'a reçu d'applications pratiques que dans la construction du matériel ferroviaire et de certains ouvrages architecturaux.

Plusieurs études du Centre de Recherches Métallurgiques d'UGINE ont cependant montré l'intérêt de l'utilisation d'aciers austénitiques écrouis en construction chaudronnée.

Il n'est pas question d'en donner ici tous les détails et nous n'en retiendrons que les conclusions :

— le soudage met en œuvre tout le domaine de températures compris entre la température de fusion et la température ambiante, mais le maintien en température est de courte durée et la température varie, à un instant donné, d'un point à un autre du métal;

— les zones thermiquement affectées subissent un traitement qui se rapproche plus de la détente que de l'adoucissement ; on n'en voudra pour preuve que ce résultat très important : l'écrouissage provoquant un gain ΔR de résistance à la rupture, l'épreuve sur joint soudé montre que la chute de résistance, due au soudage, est seulement de l'ordre de $\frac{\Delta R}{3}$.

Les règlements en vigueur, sans l'exclure, ne prévoient pas toujours l'emploi d'aciers austénitiques écrouis, mais un programme expérimental en vraie grandeur paraît souhaitable.

9 - PARAMÈTRES TECHNIQUES DU TRACÉ

Tous les constructeurs connaissent les types d'assemblage qui demeurent interdits par les codes et règlements : ces interdictions relèvent en général du simple bon sens.

Certains tracés sont nettement préférables à d'autres et les figures ci-après précisent les solutions correctes à observer dans quelques cas courants. Par exemple, les remplissages et les vidanges devront pouvoir être complets par une disposition judicieuse des tubulures.

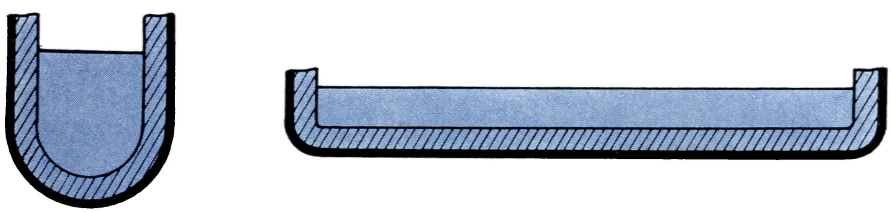
Il y a lieu de s'étendre davantage sur certains détails liés à la résistance à la corrosion et aux techniques de soudage et d'assemblage.

a) **Résistance à la corrosion.**

Il est important d'éviter toute zone à caractère franchement caverneux. Le principe doit être respecté pour toutes les zones de raccordement des fonds sur les viroles, des tuyauteries sur les supports d'entrée et de sortie, aussi bien que pour coudes, vannes et clapets.

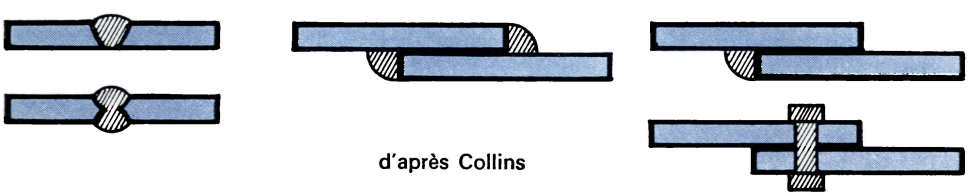
Les zones mortes, surtout dans les parties basses, sont toujours des lieux où se rassemblent impuretés de toutes sortes et produits de corrosion.

PRENDRE UN RAPPORT SURFACE/VOLUME LE PLUS FAIBLE POSSIBLE



correct d'après Jelinek mauvais

CHOISIR AVEC SOIN LES MÉTHODES D'ASSEMBLAGE

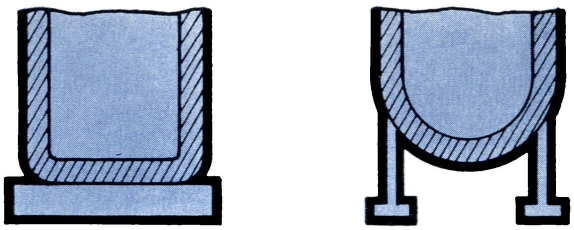


meilleur bon mauvais

d'après Collins

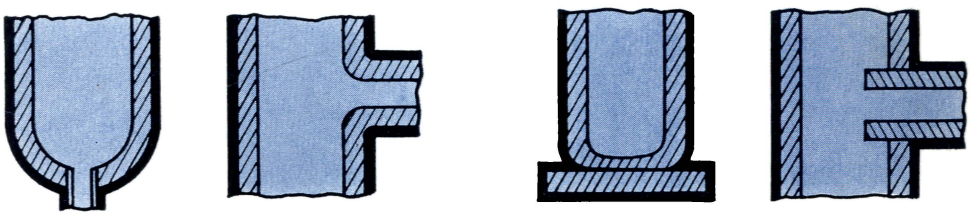
TRACÉS DE CONSTRUCTION ET DE SOUDAGE

FACILITER LA CIRCULATION DE L'AIR
AUTOUR DE L'APPAREIL



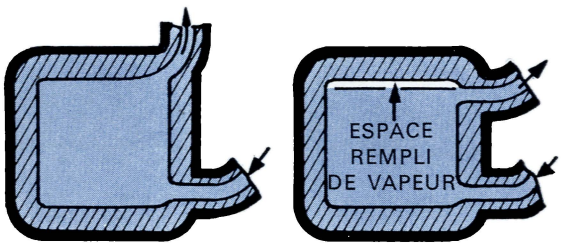
mauvais d'après Collins meilleur

ÉVITER LES ANGLES VIFS ET LES CIRCUITS TOURMENTÉS



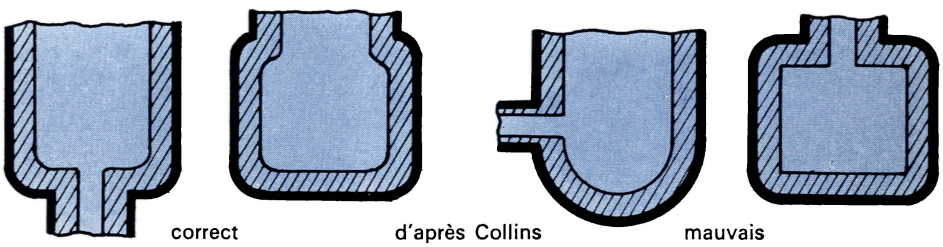
correct d'après Jelinek mauvais

VEILLER AU REMPLISSAGE COMPLET DES RÉCIPIENTS
ET ÉCHANGEURS DE CHALEUR



correct mauvais

ASSURER UN ÉCOULEMENT FACILE DU LIQUIDE



correct d'après Collins mauvais

TRACÉS DE CONSTRUCTION

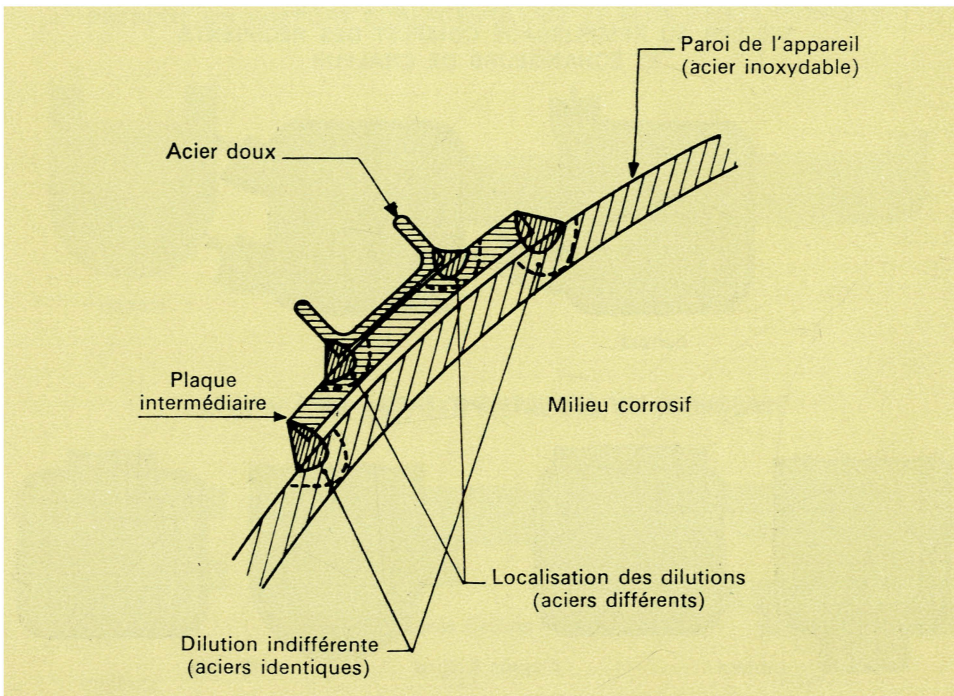
Schémas extraits de « Stainless Steel and the Chemical Industry » (Climax Molybdenum Company)

Elles sont aussi le siège de réactions parasites où le milieu ambiant peut être très différent de celui qui est décrit par l'utilisateur final comme devant servir de base au choix de la nuance d'acier inoxydable. Elles peuvent enfin être le siège de cavitations dangereuses, car les phénomènes de corrosion deviennent alors bien plus complexes que ceux auxquels on est en droit de s'attendre dans les autres parties de l'appareil.

Si l'on n'a pas pu éviter, pour des raisons fonctionnelles, de telles zones, il sera prudent d'y prévoir des piquages permettant de procéder à des rinçages périodiques.

On évitera encore les rayons de courbure trop faibles, eu égard à l'épaisseur du métal, même si l'on peut s'assurer qu'ils ne constituent pas des zones de contraintes excessives. Le formage à froid, s'il est sévère, provoque la formation de martensite d'écrouissage et les zones ainsi affectées ont tendance à devenir anodiques par rapport aux plages peu ou pas écrouies. Elles sont ainsi des zones préférentielles de corrosion, d'autant plus que les aires à caractère anodique sont moins importantes que les aires à caractère cathodique.

Il ne faut pas exagérer l'importance du phénomène, car son effet est fonction du milieu ambiant et surtout de la stabilité de l'austénite de la nuance choisie (les aciers à haut nickel et bas carbone ont des austénites très stables).



ATTACHE D'UN APPAREIL SUR CHARPENTE OU BERCEAU EN ACIER DOUX

S'il se manifeste, il est dû à une différence de structure d'une zone à une autre de l'appareil; si l'écrouissage est partout du même ordre de grandeur, il n'y a plus de différence entre une zone et une autre, et c'est pourquoi il n'y a généralement pas lieu de procéder à un traitement thermique sur les pièces telles que tubes et viroles.

b) **Techniques de soudage.**

Il est évident que le tracé des pièces doit être conçu de telle sorte que les cordons de soudure soient disposés de façon que les impératifs des techniques décrites soient respectés.

Le croisement des cordons de soudure est parfois interdit ou sujet à des servitudes particulières; le tracé doit tenir compte de ce fait.

Bien entendu, les cordons devant être arasés, les appareils seront étudiés de manière à ce que les outils de finition puissent être aisément manipulés. Le même commentaire doit être fait à propos du décapage des cordons.

c) **Assemblages hétérogènes.**

Les assemblages hétérogènes devront faire l'objet d'une attention particulière.

Il faut se rappeler en effet que le coefficient de dilatation des aciers austénitiques est de 50 % supérieur à celui de l'acier doux ; la conception des joints doit en tenir compte.

Les attaches sur la charpente ou les berceaux en acier doux devront se faire par l'intermédiaire de plaques intercalaires en acier inoxydable, soudées sur l'appareil, et dont le rôle est d'éviter une dilution des éléments d'alliage dans l'épaisseur active de la paroi.

On peut aussi souder de l'acier au carbone sur des tôles d'acier inoxydable même minces (jusqu'à 2 mm), à condition d'utiliser des électrodes suffisamment chargées en éléments d'alliage pour éviter la dilution, par exemple en acier inoxydable 25-20; les résultats ont été satisfaisants pour des citernes de transport.

Mais ce procédé, moins coûteux que le précédent, offre peut-être moins de sécurité vis-à-vis des risques de dilution dans les cas sévères de corrosion. Il est alors prudent de le contrôler avant la construction de l'appareil par un essai de soudage sur échantillons ayant les mêmes épaisseurs, afin de vérifier l'absence de dilution.

10 - PARAMÈTRES ÉCONOMIQUES DU TRACÉ

Nous avons mentionné, au paragraphe 3 du présent chapitre, l'influence de l'orientation des cordons de soudure, par rapport à la dimension caractéristique des appareils. Une disposition judicieuse des cordons, lorsqu'elle est possible, permet de diminuer les épaisseurs de façon sensible.

Plus importante est la forme des fonds. Le problème est assez complexe, comme on peut le voir par l'exemple suivant :

— pour un diamètre et une pression intérieure donnés, l'épaisseur d'un fond hémisphérique est moitié de celle de la virole cylindrique; celle d'un fond en anse de panier d'aplatissement 1/2 est égale à celle de la virole multipliée par 1,82. Le rapport des épaisseurs est dans ce cas de 3,5, mais la surface du fond elliptique est plus faible et le volume du fond hémisphérique plus grand; le problème ne peut être alors résolu qu'en pondérant convenablement les divers paramètres.

On pensera au surplus qu'il existe sur le marché des produits dont les dimensions ont été standardisées; c'est le cas des fonds, entre autres. Il y a donc lieu d'utiliser ces produits chaque fois que possible, et d'établir le tracé en conséquence.

Il faut citer enfin l'importance qu'on doit attacher au diamètre des tubulures, lorsqu'elles sont disposées en faisceaux. On sait en effet que, pour une perte de charge donnée, le débit d'un tube est proportionnel à la puissance 5/2 du diamètre, tandis que le poids du tube est proportionnel au carré du même diamètre. Il s'ensuit qu'il y a gain de poids chaque fois qu'on peut remplacer plusieurs petits tubes par un seul plus grand.

PLATEAU A CAPSULES
ACIER 18-12 Mo (NSMC)

Chapitre XX

INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES

La réussite d'une entreprise est liée à ses facultés d'adaptation, ou mieux d'adaptabilité permanente aux impératifs et aux fluctuations du marché, donc à celles des produits qu'elle fabrique.

C'est pourquoi l'étape la plus importante de la réalisation d'un appareil se situe au niveau de la conception, qui a un double aspect technique et économique, le second étant trop souvent négligé ou oublié.

Le Bureau des Méthodes joue alors un rôle essentiel, car non seulement il traite des différents aspects de la conception des appareils, mais il peut avoir à s'occuper de la recherche de produits nouveaux.

C'est donc à tous les stades de la réalisation d'un appareil chaudronné en acier inoxydable qu'il convient d'apprécier les incidences d'ordre économique. Quoique déjà indiquées précédemment, elles méritent d'être examinées plus en détail aux phases successives :

— engineering,
— fournitures,
— mise en œuvre,
— utilisation de l'appareil,

sans que soit faite une synthèse des différents éléments évoqués, puisque chaque construction chaudronnée est un cas particulier d'utilisation.

1 - ENGINEERING

a) **Cellules fonctionnelles et cellules annexes.**

Pour la sélection d'une nuance d'acier inoxydable, l'expérimentation au laboratoire, l'analyse du fonctionnement d'installations antérieures conduisent souvent à choisir entre une solution d'absolue sécurité et une solution moins coûteuse, comportant un minimum de risques contrôlés.

La décision devra tenir compte de la place de l'appareil dans l'ensemble de l'installation étudiée, c'est-à-dire qu'il convient d'estimer les conséquences et le coût de tout arrêt de fonctionnement et qu'il est justifié d'adopter, en cas de nécessité, une nuance plus coûteuse pour les cellules fonctionnelles qui ne peuvent être mises en « by-pass », le coût supplémentaire du métal étant absorbé dès le premier arrêt de l'appareil.

L'appréciation du coût des arrêts doit donc, dans nombre de cas, conduire à l'emploi d'aciers inoxydables là où d'autres matériaux moins nobles sont utilisés depuis longtemps. Par exemple :

— le conduit d'évacuation des gaz brûlés d'un four fonctionnant au fuel industriel doit être remplacé assez souvent; exécuté en acier inoxydable du type F 17, le même conduit a une vie au moins égale à celle du four,

— les gaines d'aspiration de vapeurs acides, telles que celles qui se trouvent obligatoirement auprès des bacs de décapage, sont rapidement corrodées, à moins qu'elles ne soient construites en acier inoxydable du type 18-10, ou mieux en acier NSMC au molybdène,

— le trichloréthylène en phase vapeur n'est pas un produit très corrodant, mais les condensations sont porteuses d'acide chlorhydrique, d'où l'intérêt d'utiliser des gaines en acier inoxydable.

b) **Poids de métal mis en œuvre.**

Le calcul des pièces fonctionnant en traction ou compression pure est basé sur les caractéristiques mécaniques des matériaux qui, convenablement pondérées, définissent le taux de travail admissible N.

Il est intéressant d'estimer la masse de l'unité de contrainte ou, si l'on préfère, de connaître la contrainte maximale qu'autorise l'unité de masse du matériau en calculant l'indice I défini par la relation suivante :

$$I = \frac{N \alpha}{d}$$

où N est la contrainte maximale admissible,

α est le coefficient de joint,

d est la masse volumique du matériau.

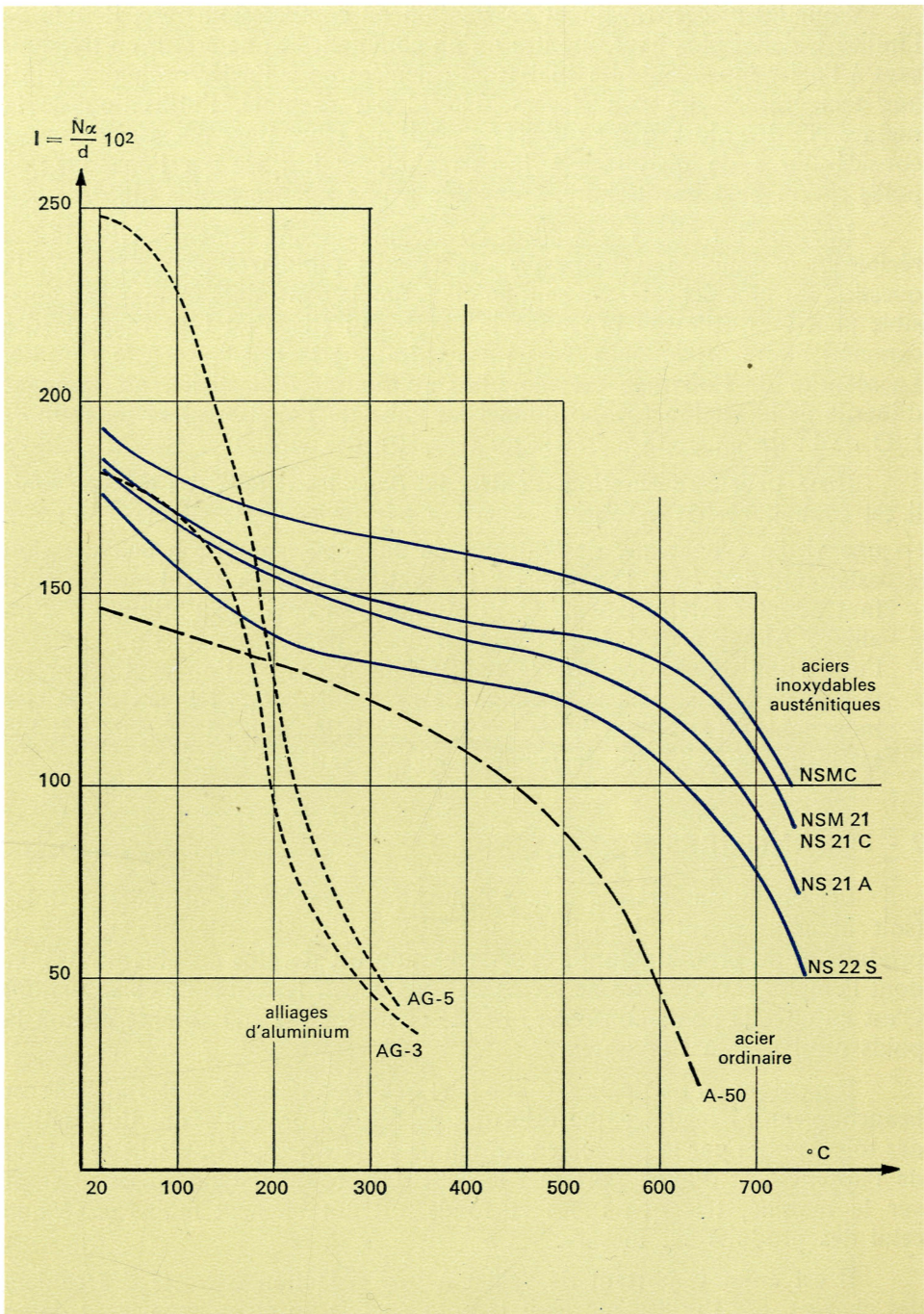
L'indice I varie d'un matériau à un autre et, pour un même matériau, décroît lorsque la température augmente. Plus il est élevé, plus la construction est légère, toutes autres conditions étant identiques.

Les courbes du graphique ci-contre montrent que dans les conditions indiquées les aciers inoxydables conduisent à un allégement notable des structures, surtout lorsque la température dépasse 150 °C.

c) **Transpositions.**

Lorsqu'on utilise une nuance d'acier inoxydable à la place d'un autre matériau, cette transposition doit tenir compte de toutes les propriétés des aciers inoxydables.

La surépaisseur de corrosion, tout d'abord, sera éventuellement nulle, ou tout au moins réduite à un minimum.



VARIATIONS DE L'INDICE I EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Pour les pièces travaillant en traction ou compression pure, l'étude de l'indice I, défini plus haut, montre qu'on commettrait une erreur en transposant à l'acier inoxydable les épaisseurs calculées pour l'acier ordinaire. Ainsi aux températures un peu élevées, 350 °C par exemple, l'utilisation de la nuance NSMC, alors même qu'elle ne serait pas tenue pour nécessaire par des considérations de résistance à la corrosion, est justifiée par l'économie de poids qu'on peut en attendre, comparée à une nuance moins alliée.

Lorsque les pièces travaillent en compression, comme c'est le cas des récipients à double enveloppe ou des circuits tubulaires en dépression, la question est plus délicate. On sait, en effet, que la contrainte maximale admissible peut être celle qui provoque le flambage : elle n'est plus fonction des caractéristiques mécaniques classiques, telles que la résistance à la rupture. La sécurité de l'ouvrage est alors liée au module d'élasticité, au moment d'inertie de la section (proportionnel au cube de l'épaisseur) et au rapport L/D de la distance entre frettes au diamètre des viroles.

Il ne peut être question d'entrer ici dans les détails des calculs, mais il est souhaitable de préciser la question par un exemple simple, soit :

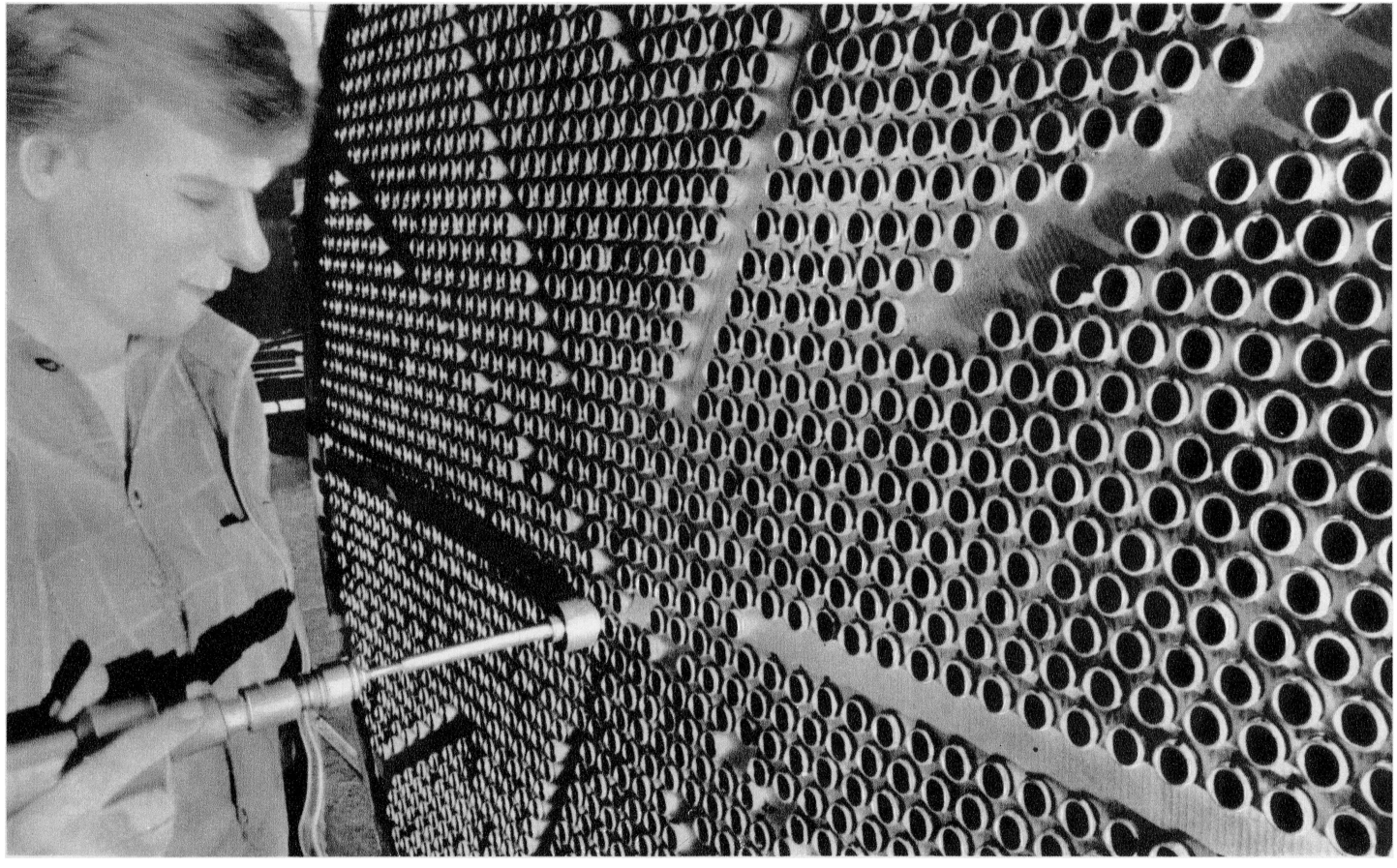
— une virole cylindrique de 800 mm de diamètre, soumise à une pression extérieure de 2 bars, le rapport L/D étant égal à 2. Le calcul montre qu'il faut adopter une épaisseur de 10 mm, si l'on envisage l'utilisation d'un alliage Al-Mg à 3 % Mg et une épaisseur de 6,5 mm si l'on envisage l'utilisation d'acier inoxydable 18-10; dans le cas où l'on peut serrer les frettes, de telle sorte que la valeur de L/D soit de 0,5, l'épaisseur d'acier inoxydable est réduite à 3,5 mm et le poids de la virole en acier inoxydable est le même que celui de la virole en alliage léger.

2 - FOURNITURES

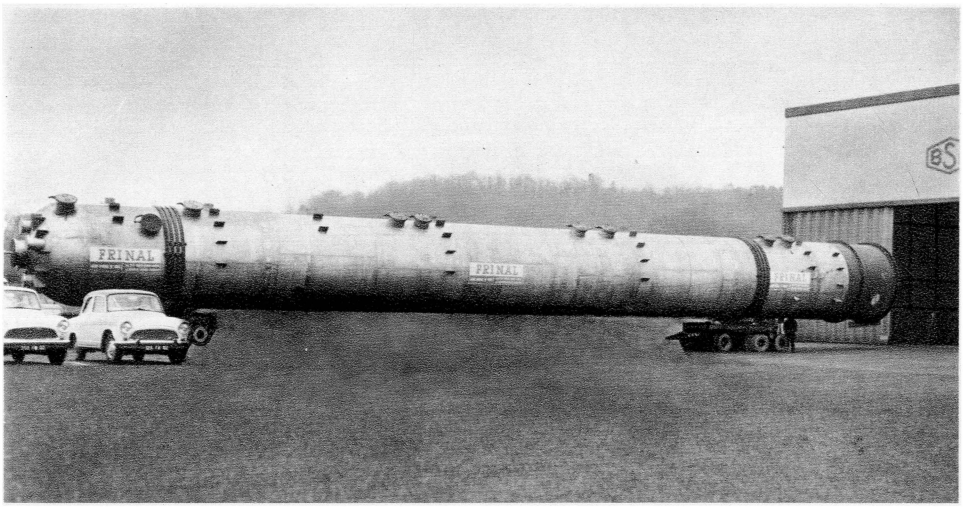
Les chaudronniers ont à leur disposition une grande diversité de tôles (soit immédiatement disponibles, soit approvisionnées d'usine), de demi-produits et de produits dont l'état de finition est de plus en plus poussé, et dont l'emploi rationnel a une incidence notable sur les coûts de construction. C'est en effet le poids consommé par le chaudronnier qui compte et non le poids qu'il livre à l'utilisateur.

Rappelons en particulier, d'une part que le polissage des tôles en usine est beaucoup moins onéreux que celui des pièces conformées et que l'utilisation des tôles, polies par le producteur, diminue de façon appréciable le coût final de l'appareil, et d'autre part que le coût des produits standardisés existant sur le marché, tels que tubes et fonds, est notablement moins élevé que celui des produits sur mesure.

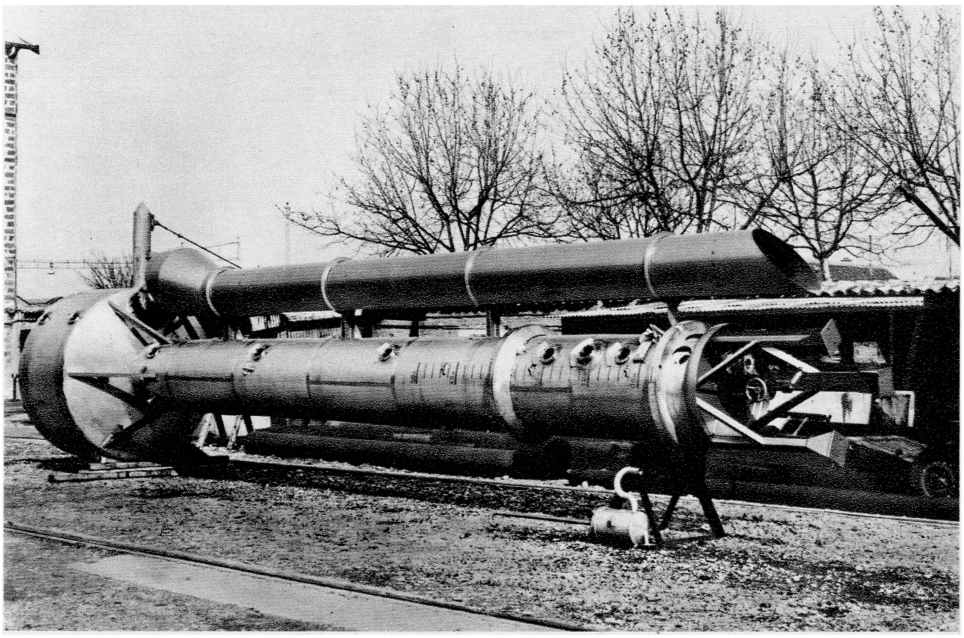
Il est enfin important de veiller à une rédaction correcte des cahiers des charges, car l'utilisateur final impose parfois au chaudronnier, et de ce fait à son fournisseur d'acier inoxydable, des clauses dont l'incidence est hors de proportion avec l'usage qui est fait du métal.



DUDGEONNAGE D'UN FAISCEAU TUBULAIRE D'ÉCHANGEUR
ACIER 18-12 Mo (NSM 21 S)



RÉGÉNÉRATEUR POUR INSTALLATION DE PRODUCTION D'AMMONIAQUE
ACIER 18-12 Mo (NSM 22 S)



TOUR DE FERMENTATION CONTINUE
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Par exemple des clauses peuvent conduire à proposer des nuances spéciales, non seulement très coûteuses en elles-mêmes, mais livrées avec de longs délais, et non utilisées pour fabriquer des produits standards.

3 - MISE EN ŒUVRE

Le rôle du Bureau des Méthodes, qui est primordial lors de la fixation des paramètres économiques du tracé, devient ici déterminant et il est important de rappeler quelques recommandations valables dans de nombreux cas :

— simplifier les gammes de fabrication en faisant appel aux procédés de formage les moins coûteux, en fonction de la série à réaliser (cas des fonds en particulier) et en utilisant les demi-produits existant sur le marché,
— procéder à une étude critique des procédés de soudage; ainsi une passe de fond sous argon peut être plus coûteuse, mais finalement bénéfique, si l'on tient compte des reprises pour modifications ou réparations,
— éviter les décapages et les décontaminations inutiles en particulier par une protection constante des surfaces au cours des manutentions et des diverses opérations; les limiter alors si possible aux soudures,
— éviter les travaux de conformation à chaud, qui entraînent presque toujours des traitements thermiques, suivis de décapages.

4 - UTILISATION DE L'APPAREIL

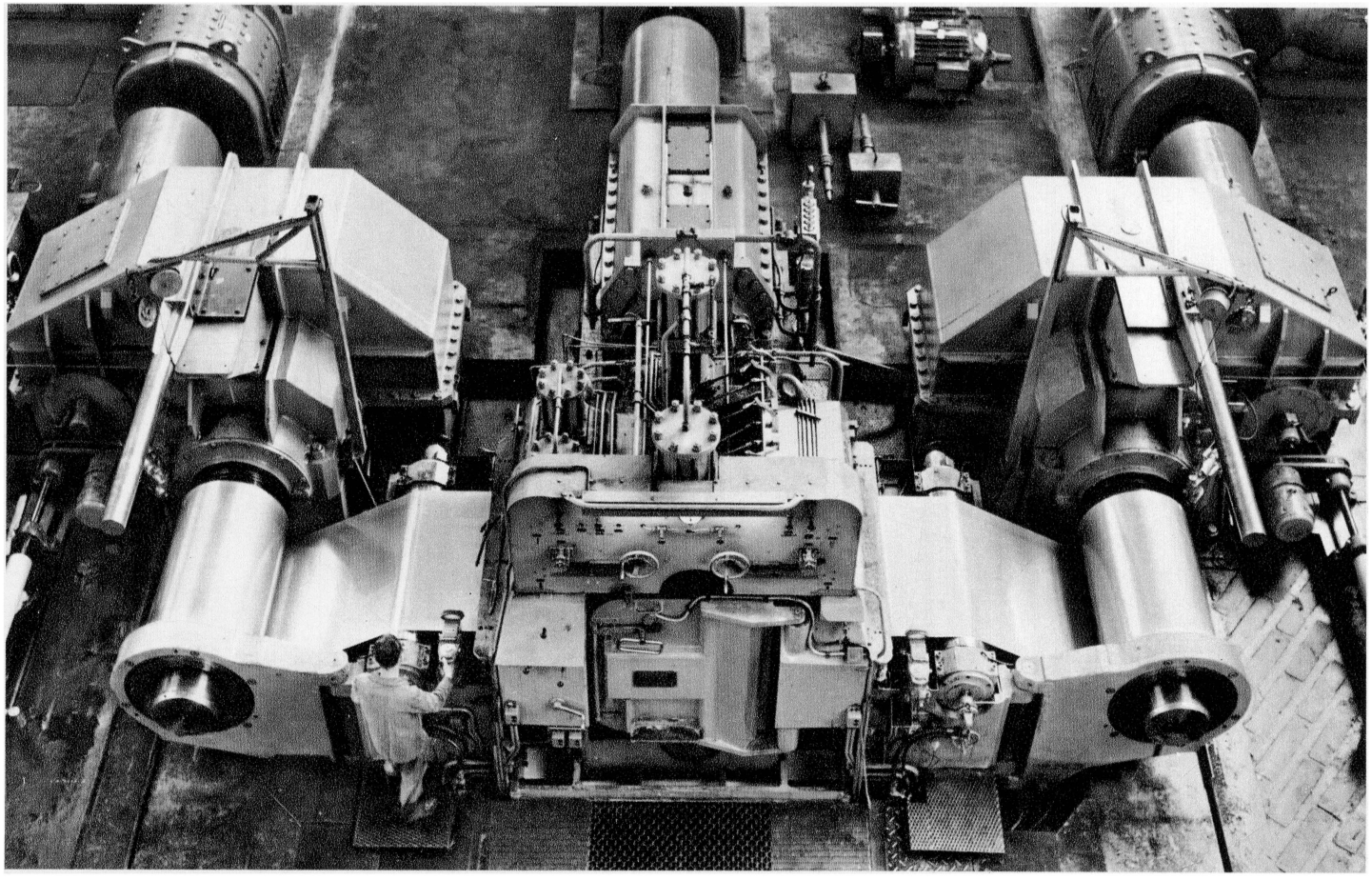
Les avantages économiques des aciers inoxydables lors de l'exploitation sont très nombreux. Les principaux qui découlent de leurs propriétés se résument ainsi :

— matériau massif, les détériorations se corrigent d'elles-mêmes et la protection par peinture, revêtement ou traitement de surface est inutile,
— du fait d'un poids moindre de l'appareil, les manutentions et les transports sont plus aisés, la charge utile des citernes destinées au stockage et au transport est plus élevée et les livraisons d'appareils entiers par la route sont facilitées,
— la durée d'un appareil est plus longue, les immobilisations pour entretien sont pratiquement nulles car cet entretien se limite à de simples nettoyages,
— les réparations éventuelles et spécialement par soudure, qui sont faciles (particulièrement avec les aciers austénitiques), et les modifications de tous ordres qui sont aisées (par exemple l'adjonction de piquages) ne posent pas de problème de remise en état des surfaces,
— l'aptitude aux nettoyages et décontamination énergiques permet de banaliser les récipients de stockage et de transport (remplissages successifs avec des liquides différents) et de réduire le coût des parcs de matériel.

Dans un grand nombre de cas, l'emploi d'aciers inoxydables dans la construction chaudronnée conduit donc à des installations d'une bonne rentabilité et c'est la principale des considérations qui plaide en leur faveur.

Cinquième partie

EXEMPLES CARACTÉRISTIQUES D'EMPLOI DES ACIERS INOXYDABLES



TRAIN SENDZIMIR DES FORGES DE GUEUGNON

Les aciers inoxydables ont des emplois très variés dont les domaines couvrent un grand nombre d'industries.

L'énumération ci-dessous situe pour chacune des principales professions utilisatrices les propriétés majeures qui motivent le choix de l'acier inoxydable :

— Chimie : résistance à la corrosion;
— Pharmacie : inaltérabilité - propreté;
— Nucléaire : résistance à la corrosion - sécurité;
— Textile : résistance à la corrosion;
— Aliments : propreté;
— Transports : inaltérabilité - facilité d'entretien - allégement;
— Thermique : résistance à l'oxydation à chaud et au fluage.

Cependant, chaque utilisation demande un examen particulier.

Il faut citer parmi d'autres industries utilisant l'acier inoxydable :

— Papeterie et Cartonnerie;
— Pétrole et Pétrochimie;
— Aéronautique et Espace;
— Bâtiment et Décoration;
— Appareils Ménagers.

En fait, toutes les professions emploient actuellement plus ou moins de l'acier inoxydable pour des pièces très diverses, les nuances étant choisies en fonction des conditions d'utilisation du matériel.

FUTS A BIÈRE
ACIER 18-10 (NS 21 A)

Chapitre XXI

MILIEUX SPÉCIFIQUES

La tenue des aciers inoxydables a été étudiée dans tous les milieux susceptibles d'être corrosifs et au chapitre XXV des «Tables de Corrosion» indiquent les nuances conseillées pour chacun des milieux courants.

Toutefois, ces indications se rapportent le plus souvent à des produits exempts d'impuretés, ce qui n'est pas le cas en général dans l'industrie.

Cependant, les aciers inoxydables ont permis depuis plusieurs années de faire faire d'importants progrès à l'équipement de nombreuses industries pour la transformation, le stockage, la manutention et le transport de produits très divers en raison des avantages que ces aciers présentent par rapport à d'autres matériaux. Les exemples cités plus loin en sont l'illustration.

Ces indications générales permettent à l'utilisateur de se faire une idée des possibilités offertes et notre Centre Technique, ainsi que les Ingénieurs de la Société UGINE-GUEUGNON, peuvent répondre à toute question destinée à éclaircir un problème embarrassant.

1 - EAUX ET VAPEUR D'EAU

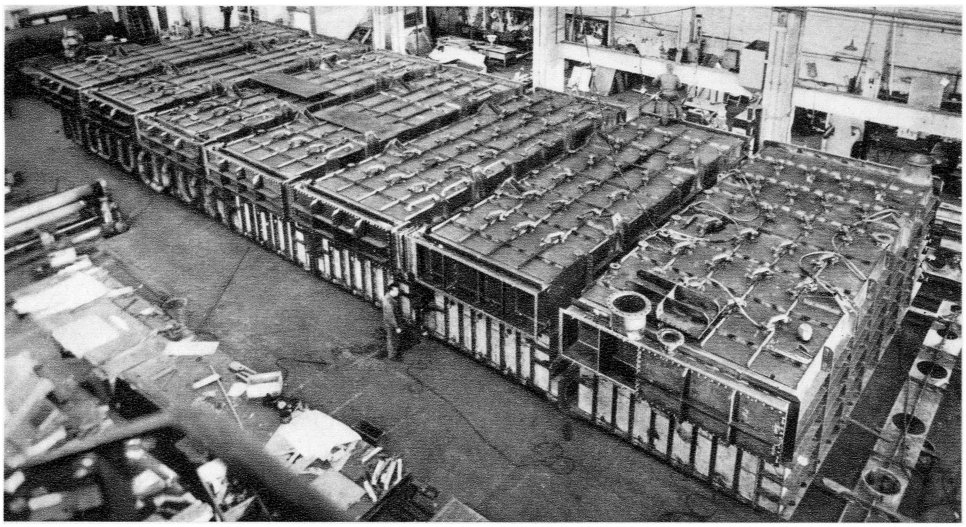
Les échangeurs de chaleur utilisent le plus souvent l'eau comme fluide réfrigérant et dans l'industrie nombre de ceux-ci sont construits en acier inoxydable.

L'eau pure, obtenue par distillation ou échange d'ions, n'attaque aucun acier inoxydable : elle ne contient aucun ion conducteur de courant électrique, donc elle ne peut donner naissance à une corrosion électrochimique.

Mais, dans la nature, l'eau est toujours chargée de sels minéraux dissous. Au contraire de ce qui se passe avec l'acier ordinaire, le gaz carbonique, les carbonates, les sulfates n'ont aucune action sur les aciers inoxydables, matériau de choix pour tout ce qui concerne l'utilisation de ces produits. Par contre, les chlorures peuvent être générateurs de piqûres (rupture locale de la couche passive) et provoquer au-dessus de 60-70 °C de la corrosion sous tension.

En général, les nuances NSMC et NSM 21 S donnent plus de sécurité du fait de la présence de molybdène et, s'il y a risque de corrosion sous tension, il faut choisir les nuances au molybdène sans titane à très bas carbone.

La tenue du métal dépend non seulement des conditions de fonctionnement (température, concentration...), mais aussi de la conception des appareils. D'une façon générale la circulation rapide du liquide empêche la formation de dépôts et réduit les risques de corrosion par piqûres; c'est pourquoi nous



POSTE DE DISTILLATION D'EAU DE MER
CUVES EXTÉRIEURES EN ACIER 18-12 Mo (NSMC)

conseillons habituellement de faire circuler l'eau à l'intérieur des tubes des échangeurs plutôt qu'à l'extérieur. Pour certaines applications plus difficiles, il est parfois indispensable de déchlorurer l'eau par bipermutation.

Pour la tenue dans l'eau de mer, le Centre de Recherches Métallurgiques d'UGINE a effectué d'importants travaux pour la construction de l'usine marémotrice de la Rance. Le NSPM3 à durcissement structural a été choisi pour la réalisation de pièces mobiles soumises à la cavitation et à l'érosion et le NSM 22 S pour la réalisation de pièces fixes soumises à la corrosion par l'eau de mer brassée.

D'une façon générale, la corrosion par l'eau de mer, due aux ions chlore, est négligeable pour le métal immergé en l'absence d'organismes marins et il n'y a risque de corrosion que dans la zone située juste au-dessous de la ligne de niveau, risque d'autant plus faible que l'eau est plus agitée. Il faut toujours éviter l'adhérence sur le métal de coquillages qui provoquent de la corrosion caverneuse.

Les usines de dessalement produisent de l'eau douce à partir d'eau de mer préalablement traitée afin d'éviter dans les appareils la formation de dépôts, la prolifération d'algues et de coquillages. Les nuances généralement employées sont : NSMC, NSM 22 S et NSCD.

L'acier inoxydable est intéressant pour tous les appareils en contact avec de la **vapeur d'eau,** mais cette dernière est nocive en dessous de 650 °C si elle contient des chlorures; dans ce cas, il faut surveiller les zones où des condensations peuvent se produire. Il faut utiliser les mêmes nuances que pour l'eau naturelle dans des conditions semblables de fonctionnement.

2 - ACIDES ET PRODUITS MINÉRAUX

Acide nitrique

L'industrie de l'acide nitrique est la première à avoir utilisé d'importants tonnages d'acier inoxydable 18/10.

L'acier à très bas carbone NS 22 S est la nuance type utilisée dans cette industrie, cet acide étant générateur de corrosion intergranulaire. C'est ainsi que les colonnes d'absorption, les échangeurs et les réservoirs de stockage des unités de fabrication d'acide sont en NS 22 S.

A partir d'une concentration pondérale de 65 % et en élevant la température, la corrosion devient plus importante. Le NS 22 S est utilisé à froid jusqu'à 98 % et dans l'acide nitrique fumant additionné d'inhibiteur.

On peut également utiliser des aciers stabilisés au titane et au niobium NS 21 S et NS 95, mais ceux-ci sont à proscrire dans l'acide nitrique concentré et chaud car les soudures subissent une corrosion incisive en « lame de couteau ».

L'acier ferritique F17 peut être quelquefois employé mais la soudure des tôles épaisses est plus délicate et nous recommandons le recuit des appareils terminés fonctionnant sous pression, qui est indispensable.

Acide sulfurique

La tenue de l'acier inoxydable dans l'acide sulfurique dépend non seulement de la concentration et de la température, mais aussi des impuretés de l'acide et de l'état de surface de ce métal.

La présence d'acide nitrique, de nitrates ou d'arsenic améliore la résistance à la corrosion. Lorsque la surface se trouve à l'état passif, la vitesse de corrosion est négligeable.

Les solutions sulfuriques provoquent des corrosions intergranulaires. Il faut utiliser les nuances au molybdène à très bas carbone ou stabilisées : NSMC, NSM 21 S, NSM 22 S et quelquefois recourir au NSCD qui permet de résister à des corrosions plus sévères.

L'acide sulfurique, acide fort et bon marché, est employé dans une multitude d'applications industrielles, d'oxydation, de sulfonation et de déshydratation où les nuances ci-dessus sont largement utilisées.

Les mélanges sulfo-nitriques utilisent le plus souvent le NS 22 S.

Acide phosphorique

L'acide phosphorique nécessite l'emploi d'aciers au molybdène à très bas carbone ou stabilisés, car il provoque également de la corrosion intergranulaire.

Il est fabriqué selon deux procédés :

— voie sèche qui donne un acide relativement pur, à 75-85 % de concentration. Le NSMC convient généralement pour l'acide ainsi fabriqué.

— voie humide, par attaque des phosphates par l'acide sulfurique; l'acide contient de nombreuses impuretés : fluor, chlore, silice... qui le rendent très corrosif.

Ce dernier procédé est de beaucoup le plus répandu car cet acide est utilisé pour la fabrication des engrais. Le NSCD est choisi pour les pales des agitateurs des cuves d'attaque. Le filtre est généralement exécuté en NSM 22 S ou NSM 23. Les cuves de stockage à la température ambiante, à condition que la teneur pondérale en fluor ne dépasse pas 1 %, sont en NSMC ou en NSM 22 S.

Engrais

Les engrais modernes sont généralement fabriqués à partir des acides minéraux précédents en passant par une phase liquide, concentrée en sels, ou par une phase pâteuse. Ces solutions, généralement très corrosives, nécessitent l'emploi d'acier inoxydable. Nous citerons, à titre d'exemple, les utilisations suivantes :

— NS 22 S pour les appareils de fabrication du nitrate d'ammonium et les ammonitrates.

— NS 21 A ou NSM 21 S pour les unités de synthèse d'urée; les appareils fonctionnant à 200 °C et sous haute pression en présence de carbamates étant réalisés en NSM 21 S à basse teneur en ferrite.

— NSMC et NSM 22 S dans l'attaque nitrique des phosphates pour obtenir des engrais ternaires.

— NSCD pour le saturateur de sulfate d'ammoniaque, et le NSM 22 S pour les appareils soumis aux corrosions moins sévères.

Acide chlorhydrique

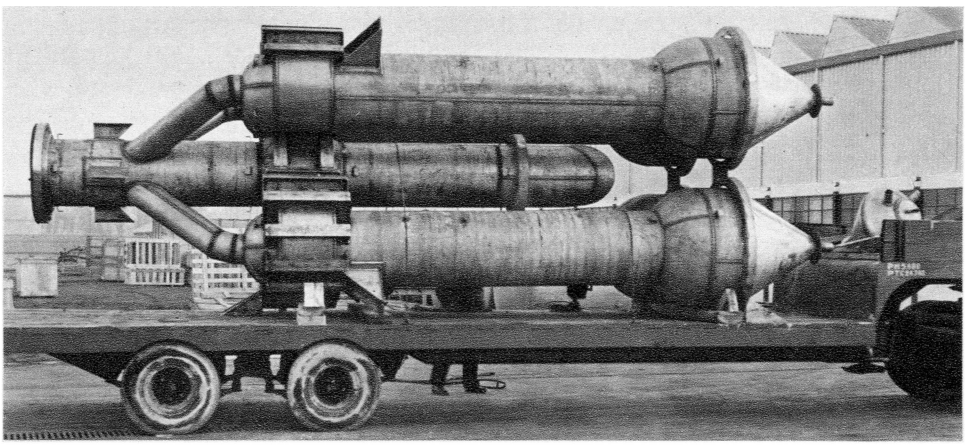
La corrosion des aciers inoxydables dans l'acide chlorhydrique augmente régulièrement avec la concentration et la température. Les aciers inoxydables au molybdène ne peuvent être utilisés à froid que pour des solutions très diluées. Les alliages UC 76 C (avec oxydants) et UC 87 B (sans oxydants) ont des domaines d'application étendus et apportent des solutions intéressantes.

3 - ACIDES ORGANIQUES

Les acides organiques, surtout impurs, provoquent souvent de la corrosion intergranulaire. On utilisera donc des nuances à très bas carbone ou stabilisées.

Ces acides sont en général peu agressifs à la température ambiante et le NS 22 S est souvent envisagé. La corrosion augmente avec la concentration et la température: le NSMC ou le NSM 21 S permet de résoudre la plupart des problèmes de corrosion.

Ainsi par exemple, le NS 22 S convient à froid avec l'acide acétique dilué. Par contre, en élevant la concentration et la température, il faut utiliser le NSMC et pour les hautes concentrations on peut être amené à choisir des nuances plus riches en molybdène telles que le NSM 22 S et même le NSM 23.



BATTERIES DE QUATRE CYCLONES (RAFFINERIE DE PÉTROLE)
ACIER 18-10 (NS 22 S)

L'acide formique, plus corrosif, nécessite toujours l'emploi de nuances au molybdène.

Les acides gras supérieurs (stéariques, oléiques...) ne sont en général pas corrosifs à froid, mais peuvent nécessiter l'emploi de l'acier inoxydable afin de conserver la propreté ou la couleur du produit. Les opérations de distillation, de raffinage et de désodorisation de ces acides se font vers 200-300 °C dans des appareils en NSMC.

4 - PRODUITS ORGANIQUES

La chimie organique est une industrie en perpétuelle évolution. A l'origine, ses produits étaient pratiquement limités aux dérivés de la houille ; aujourd'hui elle dispose d'une gamme étendue de produits de base fournis presque totalement par le pétrole et le gaz naturel.

Le NS 22 S et le NSMC sont largement employés pour la construction des appareils chaudronnés utilisés pour la fabrication des produits organiques de base : méthanol, formol, acétone, phénol, oxyde d'éthylène... et dans leurs applications.

L'emploi de l'acier inoxydable classique reste limité dans les chlorations de produits organiques car il se forme souvent de l'acide chlorhydrique. Il faut parfois recourir au NSCD ou au titane.

5 - SOLUTIONS ALCALINES

Les solutions de soude et de potasse sont en général peu corrosives à froid. Dans les solutions concentrées et au-dessus de 60 °C, les aciers sont sujets à la corrosion sous tension.

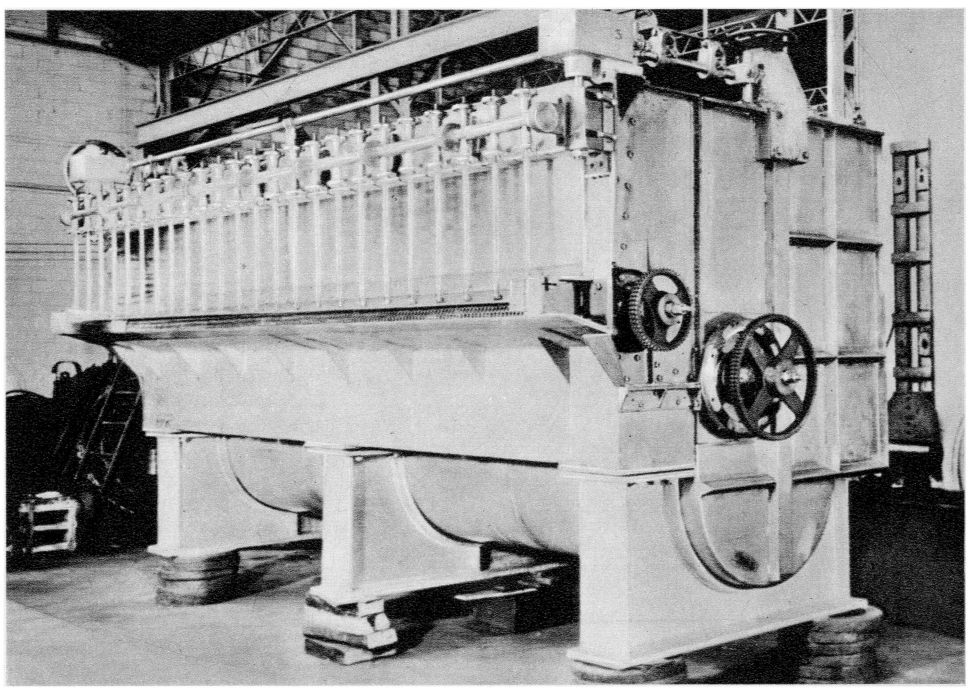
Le NSMC est utilisé jusqu'à 110 °C dans la solution à 50 % de soude. Les wagons citernes de transport de cette lessive sont également en NSMC. L'acier inoxydable peut être également choisi parce qu'il maintient la pureté de la solution.

6 - SOLUTIONS SALINES

La plupart des solutions salines (nitrates, sulfates neutres, phosphates...) n'attaquent pas les aciers inoxydables.

Dans les solutions contenant des chlorures, les aciers inoxydables sont exposés aux phénomènes de piqûres et à partir de 60 °C aux corrosions sous tension. Les nuances contenant du molybdène résistent mieux mais il est quelquefois nécessaire de recourir au NSCD, à l'UC 76 C ou au titane. La tenue du métal dépend beaucoup du mode de construction de l'appareil et des conditions de marche : pH, températures, sens et vitesse de circulation des fluides, présence de zones mortes, d'interstices, de dépôts, d'aération différentielle.

Le NS 22 S peut être utilisé à froid avec les sulfates acides, mais à température plus élevée il faut recourir au NSMC et parfois au NSCD.



CAISSE D'ARRIVÉE DE PATE POUR MACHINE A PAPIER
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Chapitre XXII

DOMAINES INDUSTRIELS

1 - INDUSTRIE PHARMACEUTIQUE

L'industrie pharmaceutique exige un métal résistant parfaitement aux corrosions : aucune impureté ne doit passer, même à l'état de trace, dans le produit fabriqué. L'acier inoxydable répond parfaitement à ces critères; le NS 22 S et le NSMC sont largement répandus.

2 - INDUSTRIE PHOTOGRAPHIQUE

L'industrie photographique impose un matériel qui ne doit céder à aucun produit de corrosion ni aucune trace de sel métallique dans les émulsions afin de ne pas provoquer de taches dans les films. Le NSMC convient parfaitement et est largement utilisé pour les appareils de fabrication des émulsions et les cuves de développement.

3 - INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Les aciers inoxydables classiques à très bas carbone NS 22 S, NSM 21 S et NSM 22 S sont très utilisés dans les réacteurs et les usines de traitement de combustibles car ils résistent à la corrosion de très nombreux milieux. Le NSMC et le NS 21 C sont retenus pour les applications aux températures élevées.

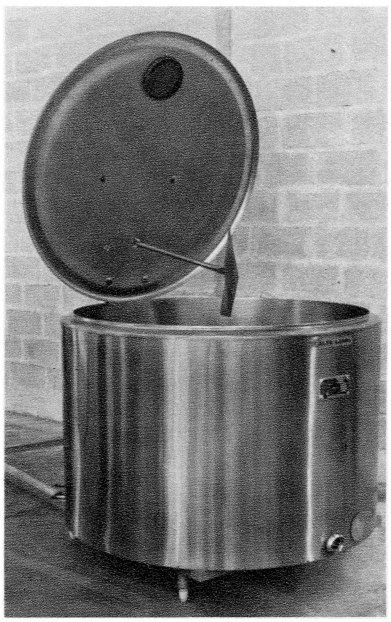
Les exigences de plus en plus sévères sur la sécurité des opérations et sur la pureté des produits nous ont conduits à mettre au point de nouvelles nuances (NS 22 A et NSM 22 A à teneur en carbone inférieure à 0,020 %) ou à modifier certains processus d'élaboration afin de fournir des aciers contenant de très faibles doses d'éléments activables (cobalt, manganèse par exemple).

4 - INDUSTRIE PAPETIÈRE

Les aciers inoxydables sont de plus en plus employés pour les appareils de fabrication de la pâte chimique. Le procédé au bisulfite requiert des nuances au molybdène, principalement le NSMC, pour résister à l'attaque de l'acide sulfureux. Le procédé à la soude, moins corrosif, fait appel surtout au NS 22 S.

La pâte blanchie est obtenue par une suite de traitements au chlore, à la soude ou au chlorite qui nécessitent l'emploi de nuances allant du NS 21 A au NSM 23. En dehors des problèmes de corrosion, le NS 21 A est choisi pour la réalisation de tuyauteries d'écoulement, spécialement afin d'empêcher la formation de micro-organismes ou pour éviter l'encrassement (l'acier est poli pour cette dernière application).

CUVES DE STOCKAGE DE VIN
ACIER 18-12 Mo (NSMC)



CUVE DE RÉFRIGÉRATION DE LAIT
A LA FERME DE 1.000 LITRES
ACIER 18-10 (NS 21 A)

CITERNES HÉMISPHÉRIQUES DE RAMASSAGE DE LAIT A LA FERME
(FABRIQUÉES PAR FORMAGE PAR EXPLOSION)
ACIER 18-10 (NS 21 A)

5 - INDUSTRIE PÉTROLIÈRE

Sauf quelques exceptions (acide naphténique, furfurol...), les produits pétroliers sont peu corrosifs. Le FIA s'est imposé à la place de l'acier doux pour la confection de plateaux de la plupart des colonnes de distillation : son emploi a permis de supprimer la surépaisseur de corrosion, donc de réduire le poids des appareils.

Les tubes de cracking des naphtes doivent résister à la pression, au fluage et à l'oxydation à haute température : c'est le domaine d'utilisation du NS 30.

6 - FOURS INDUSTRIELS

Ces réalisations font appel en premier lieu à la résistance à la corrosion dont les conditions, très variables d'une installation à l'autre, doivent être connues avec précision pour permettre le choix correct du métal. Les éléments de fours industriels nécessitent généralement une bonne résistance aux chocs thermiques.

Les nuances ou alliages généralement employés pour cette application sont : NSZ - NS 21 C - NS 24 - NS 30.

7 - INDUSTRIE TEXTILE

Les applications les plus importantes de l'acier inoxydable dans l'industrie textile concernent le matériel de teinturerie et de blanchiment. Elles ont permis de réduire les rebuts par salissure des produits et de diminuer les frais et temps morts d'entretien.

Les appareils de teinturerie sont en général en NSMC, nuance qui résiste à l'agressivité chimique des bains et ne modifie pas l'action des colorants. L'industrie des textiles artificiels fait parfois appel au NSCD.

Le procédé au chlorite de soude donne les meilleurs résultats pour le blanchiment des textiles. L'adjonction d'un stabilisant réduit considérablement l'agressivité du milieu et le NSM 22 S donne satisfaction, notamment pour la confection de caissons travaillant en phase vapeur, avec soudures polies.

8 - INDUSTRIES ALIMENTAIRES

Laiterie

Depuis de nombreuses années les aciers inoxydables NS 21 A et NS 22 S se sont imposés dans l'industrie laitière car ils résistent à la corrosion par le lait, les produits laitiers et les détergents employés au nettoyage pour détruire les bactéries. Pour faciliter ce nettoyage, les appareils sont en général polis aux grains 150-180.

Les cuves de réfrigération de lait à la ferme constituent l'application la plus récente : elles comportent une cuve intérieure en NS 21 A poli et une cuve extérieure en F 17 ou en NS 20 P, soit polie, soit en tôle à surface travaillée (T.S.T.).

CUVE DE STOCKAGE DE BIÈRE DE 200.000 LITRES
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Industrie vinicole et des jus de fruits

Les aciers inoxydables ne sont pas corrodés par le vin selon l'échelle d'appréciation du métallurgiste, pour lequel une résistance excellente correspond à une corrosion uniforme inférieure à 0,1 mm/an. Par contre, si l'on s'en remet à l'opinion des dégustateurs, seuls les NSMC et NSM 21 S permettent d'éviter l'altération du goût et de la couleur des vins blancs sulfités, des jus de fruits acides, des eaux-de-vie. Le NS 21 A et le NS 22 S sont utilisés pour les vins rouges.

Les appareils sont réalisés en tôles laminées à froid avec polissage des soudures, ce qui permet un nettoyage facile.

Brasserie

Depuis des années les cuves de fermentation contrôlée et de stockage de bière sont réalisées en NS 21 S ou en NS 22 S. Le NS 21 A sert à la fabrication de fûts à bière.

Abattoirs

Les nuances NS 21 A et NS 22 S servent à la fabrication du matériel d'abattage : tables de travail, bacs et chariots transport de viande... Les cuves de salaison et de saumure se font en NSMC, tandis que le NSM 22 S est choisi pour les tanks à suif chauffés à 80 °C.

9 - MATÉRIEL DE TRANSPORT

L'acier inoxydable est le matériau idéal pour les citernes routières. Sa résistance à la corrosion maintient la pureté des produits et permet un large éventail dans le choix des matières véhiculées, ce qui évite dans bien des cas des retours à vide. Son nettoyage facile élimine toute pollution due aux transports successifs.

Des progrès techniques récents ont permis de construire des citernes autoportantes d'un poids mort réduit donc de charge utile augmentée.

De plus, les propriétés de l'acier inoxydable donnent une grande sécurité en cas d'accident ou d'incendie.

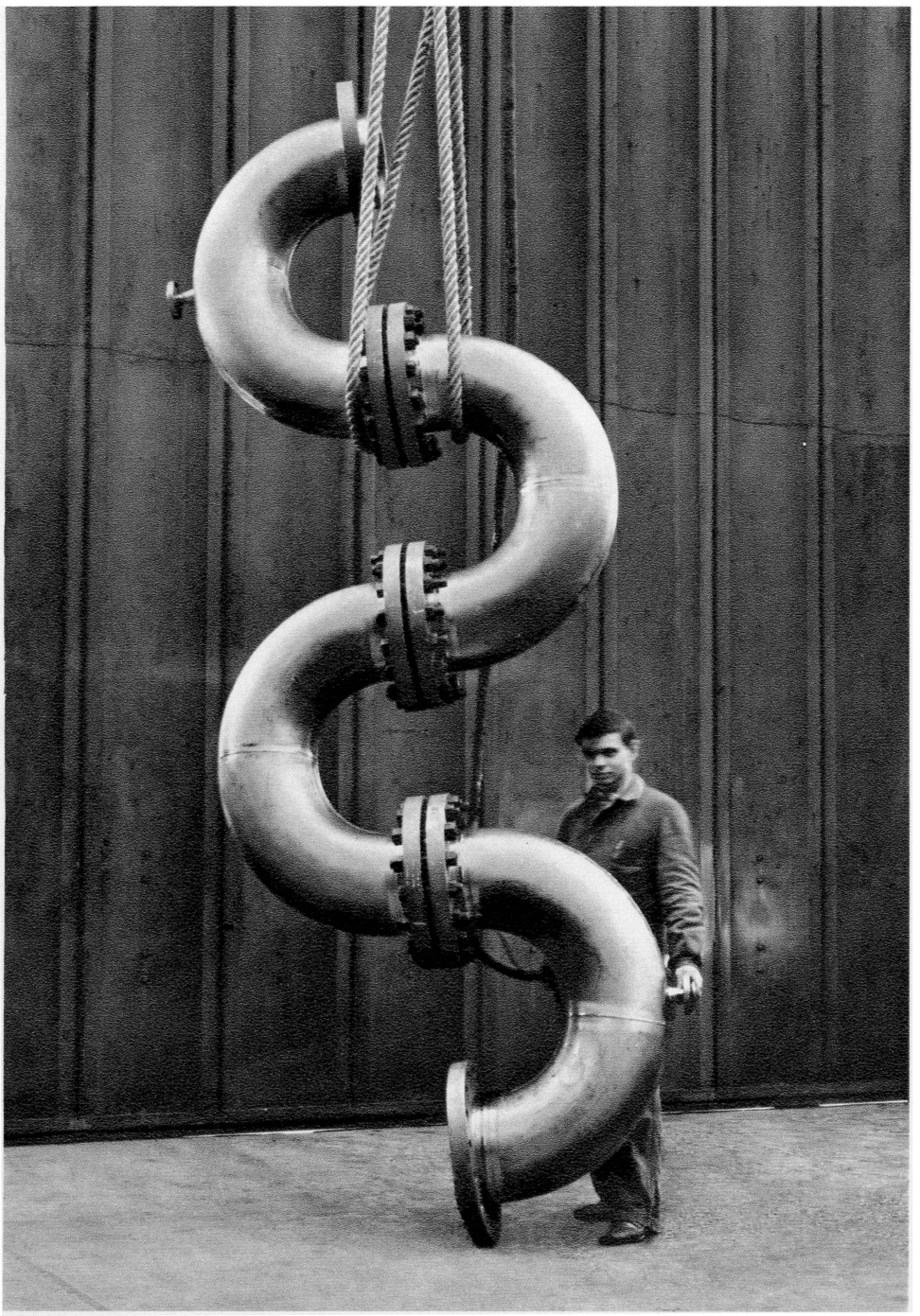
Le matériel ferroviaire en acier inoxydable sert principalement au transport de produits chimiques.

Les voitures de voyageurs (grandes lignes et banlieue) sont maintenant très généralement construites en acier NS 20 E, dont les propriétés spéciales d'écrouissage permettent l'obtention de caractéristiques mécaniques très élevées. Le poids des voitures s'en trouve réduit et, d'autre part, l'entretien est fortement diminué.

CITERNE AUTOPORTANTE A TROIS ANNEAUX DE 24.000 LITRES POUR LE LAIT
ACIER 18-10 (NS 21 A POLI)

Sixième partie

LE TITANE MÉTAL COMPLÉMENTAIRE DE L'ACIER INOXYDABLE



TUBULURES EN TITANE UT 40

Le titane est un matériau de plus en plus employé dans l'industrie, et il faut savoir que les réserves minérales de minerai de titane viennent au 4e rang après celles de l'aluminium, du fer et du magnésium.

Le titane et ses alliages ont connu durant ces dernières années un développement très rapide en raison de leurs intéressantes propriétés :

- faible poids spécifique voisin de 4,5 g/cm³, intermédiaire entre ceux de l'aluminium et du fer,
- résistance à la corrosion dans une vaste gamme de milieux, même très agressifs, par exemple dans les solutions des composés du chlore,
- résistance à la traction élevée, notamment pour les alliages, associée à de bonnes propriétés de fatigue et de résistance à l'effet d'entaille,
- flexibilité, grâce à leur faible module d'élasticité,
- bonnes propriétés cryogéniques,
- amagnétisme.

Ces caractéristiques remarquables font que le titane et ses alliages sont devenus des matériaux classiques et essentiels non seulement pour l'industrie aéronautique et spatiale (en raison de la valeur élevée du rapport résistance/poids, particulièrement importante pour les alliages de titane), mais également dans les industries chimique, électrochimique, électronique et mécanique.

Leur développement a été favorisé par l'amélioration des conditions de production, qui ont entraîné une notable diminution des prix de vente des produits offerts aux utilisateurs.

Les produits proposés par UGINE KUHLMANN aux utilisateurs comprennent deux grandes catégories :

— **le titane non allié, c'est-à-dire commercialement pur,** à 99 % au moins de titane métal, et dont la désignation est assurée par les lettres UT suivies d'un chiffre correspondant sensiblement à la charge de rupture du métal à l'état recuit : UT35, UT40, UT50, UT60.

En raison de propriétés d'emploi voisines, le titane avec palladium (UT35P) peut être adjoint à ce groupe.

— **le titane allié** qui comporte des éléments d'addition tels que l'aluminium, l'étain, le molybdène, le vanadium, le zirconium, le tungstène, etc., et dont la désignation est généralement assurée, soit par les symboles des éléments d'addition et le pourcentage de ceux ayant la teneur la plus élevée: UT35P, UTA6V, UTA6V6Sn2, UTA5E, UTA8DV, soit par un chiffre de référence : UT684.

Les tableaux se trouvant dans la septième partie de l'ouvrage (pages 220 à 224) donnent les analyses, les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques du titane et de ses alliages.

1 - RÉSISTANCE A LA CORROSION

Le titane n'est pas un métal noble au sens électrochimique du terme, comme l'or ou le platine. Son potentiel de dissolution dans les conditions standards le place au voisinage de l'aluminium et, comme ce dernier métal, et d'ailleurs aussi les aciers inoxydables, il ne pourra résister à la corrosion que par l'effet de phénomènes de passivité, le métal se recouvrant alors d'un film protecteur d'oxyde de titane. En fait la grande étendue de son domaine de passivité conduit à une excellente tenue à la corrosion, vérifiée par l'expérience.

Le titane est très résistant dans tous les milieux naturels (comprenant l'eau de mer et naturelle, l'atmosphère, les liquides physiologiques, les jus de fruits, etc.), et un grand nombre d'espèces chimiques, du moins jusqu'à leur point d'ébullition.

Il est utilisé actuellement de façon intensive dans les milieux contenant des sels de chlore, sulfures, sulfates, hypochlorites, acide nitrique, bioxyde de chlore et le chlore humide. Il résiste également à un grand nombre de composés organiques ainsi qu'à la plupart des acides oxydants.

Contrairement aux aciers inoxydables, le titane n'est pas corrodé par les solutions des composés du chlore minéraux et organiques à toutes concentrations et aux températures habituelles de manipulation des solutions. C'est dans ce domaine, essentiellement, que le titane est complémentaire des aciers inoxydables et peut trouver par conséquent des débouchés spécifiques. Il se trouve en effet que les quelques matériaux susceptibles de lui être opposés, par exemple les alliages à haute teneur en molybdène, n'apportent aucun avantage économique et constituent parfois des solutions techniques moins satisfaisantes.

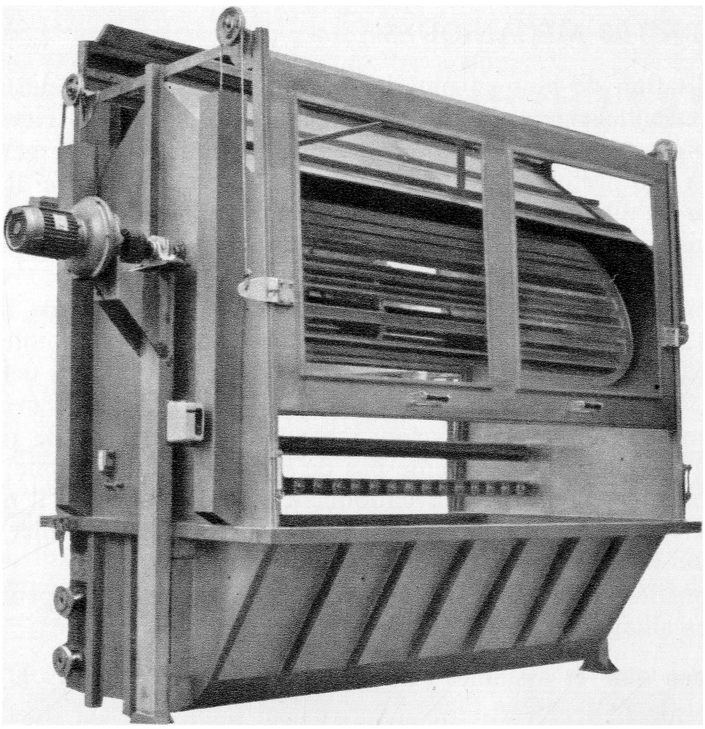
Par contre, le titane résiste moins bien aux solutions chaudes ou concentrées d'acides de type « réducteur » (par exemple les acides chlorhydrique, sulfurique, phosphorique, oxalique, formique), aux composés fluorés ionisables, à quelques solutions à faible pH (ex. chlorures d'aluminium ou de calcium concentrés et chauds) et à certains agents fortement oxydants parmi lesquels on compte :

— l'acide nitrique fumant rouge,
— l'eau oxygénée fortement concentrée,
— l'oxygène liquide ou gazeux,
— le chlore **sec.**

L'addition de certains éléments d'alliage au titane peut améliorer notablement sa résistance à la corrosion et élargir son domaine d'emploi à de nouveaux milieux.

Deux méthodes ont été appliquées avec succès pour améliorer la teneur à la corrosion dans les milieux non oxydants:

1° La première consiste à allier le titane avec un métal noble, du groupe du platine, qui forme alors une dispersion discrète de cathodes locales à faible



MACHINE DE TRAITEMENT DE LA DENTELLE AU CHLORITE
TITANE UT 35

surtension à la surface du métal et provoque une polarisation anodique par effets de piles locales.

Ainsi l'addition de 0,2 % de palladium est un moyen efficace pour obtenir une résistance améliorée aux concentrations faibles ou intermédiaires en acides non oxydants tels que HCl, H_2SO_4, H_3PO_4, acide oxalique, etc.

La résistance aux acides sulfurique et chlorhydrique bouillants à 5 % est très améliorée. De plus l'alliage conserve toutes les propriétés du titane non allié, y compris sa résistance aux milieux oxydants et des caractéristiques mécaniques pratiquement identiques; il étend donc du côté réducteur les bonnes propriétés de résistance à la corrosion de titane non allié dans les milieux oxydants.

2° La deuxième consiste à incorporer au titane des additions substantielles d'éléments qui sont normalement plus résistants que lui dans les milieux considérés, comme le molybdène.

Malgré les remarquables propriétés que nous venons d'évoquer, tous les cas ne peuvent être prévus. Nous souhaitons donc que les utilisateurs n'hésitent pas à nous consulter pour résoudre les problèmes qui leur sont posés.

2 - PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

L'utilisation de plus en plus large du titane dans les industries mécaniques est essentiellement due à son rapport résistance/poids élevé.

En effet, en particulier pour les alliages, une résistance généralement supérieure à 100 hectobars est associée à une densité de l'ordre de 4,5 g/cm³. Il en résulte un allégement considérable des appareillages et, de plus, pour les pièces en mouvement, une réduction importante des forces centrifuges ou d'inertie.

Les principales caractéristiques mécaniques à l'ambiante du titane et de ses alliages sont reportées au tableau B6, page 224. Il est à noter que leur module élastique étant la moitié environ de celui des aciers, les déformations élastiques, sous une contrainte donnée, y sont deux fois plus élevées.

Comme dans le cas des aciers inoxydables, la courbe de traction du titane et de ses alliages ne présente pas de limite élastique définie; on utilise donc généralement la valeur conventionnelle $E_{0,2}$. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que celle-ci est augmentée par l'écrouissage, en particulier lors de la conformation à froid ou de la pression d'épreuve.

En fonction des diverses caractéristiques mécaniques, on peut classer le titane et ses alliages en quatre groupes :

a) **Titane non allié et assimilés** (UT35 - UT40 - UT50 - UT60 - UT35P).

En raison de leur résistance relativement faible, de leur ductilité élevée et de leur soudabilité, ces matériaux sont généralement utilisés sous forme de tôles et pièces pour appareillages chaudronnés ou éléments de structure peu sollicités.

C'est ainsi que leur principal débouché va à l'industrie chimique avec quelques applications aéronautiques telles que calorifugeage, capotage, pièces mécaniques, cloisons pare-feu, planchers, etc.

b) **Alliages de titane à hautes caractéristiques mécaniques à l'ambiante** (UTA6V - UTA6V6Sn2).

Ces alliages sont utilisés pour des pièces ou éléments fortement sollicités au voisinage de la température ambiante de — 50 °C à + 350 °C.

C'est ainsi que la boulonnerie titane est pratiquement limitée à l'UTA6V en raison de ses bonnes propriétés à la fatigue et notre Société a résolu les problèmes métallurgiques de fabrication de barres ou ébauches matricées correspondantes.

Certaines pièces de train d'atterrissage ou enveloppes de moteurs-fusées sont réalisées en UTA6V. Mais UTA6V6Sn2 remplace UTA6V lorsque les caractéristiques de résistance ou de trempabilité de cet alliage deviennent insuffisantes pour l'emploi considéré.

c) **Alliages de titane résistant à chaud** (UTA6V, UTA8DV, UTA5E, UT684).

Bien que certains alliages de la classe précédente puissent encore convenir pour des températures modérées, la résistance au fluage vers 500-600 °C n'est

obtenue que pour des alliages spécialement développés à cet effet. UT684 est actuellement celui donnant les résultats les meilleurs.

Tous ces alliages trouvent leur principal débouché dans la partie compresseur des réacteurs d'aviation.

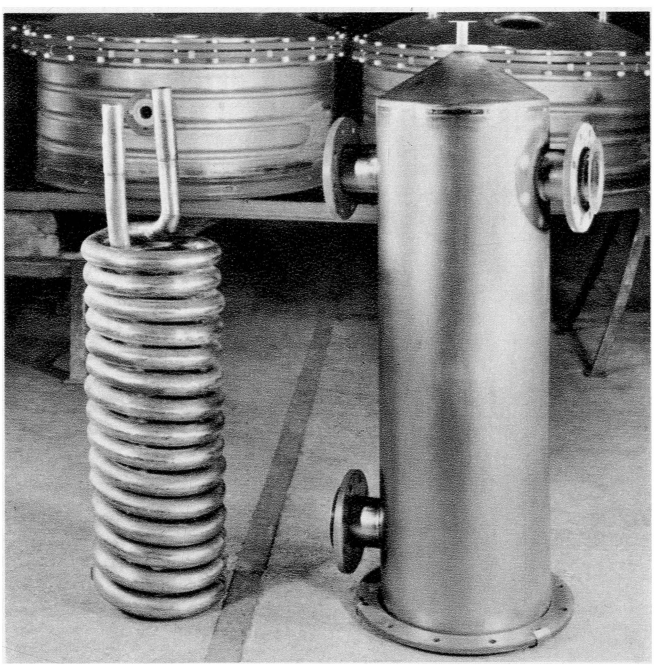
Ces alliages ont également été utilisés dans le domaine aérospatial, soit dans les réacteurs (par exemple : cols de tuyère en UTA5E) soit pour les satellites (ainsi dans les pièces chaudronnées pour les derniers étages des fusées).

d) **Alliages utilisables aux basses températures.**

Dans ce domaine, il importe d'éviter une rupture fragile et seul un certain nombre de nuances sont utilisables, en particulier pour la construction de réservoirs à gaz liquéfiés (azote, hydrogène, hélium).

Bien que le titane non allié présente une ténacité suffisante, on lui préfère généralement dans ce cas UTA5E qui est plus résistant, ou un UTA6V spécialement adapté.

Ainsi, le grand éventail de propriétés mécaniques du titane et de ses alliages permet d'envisager une application dans un grand nombre de domaines allant de — 253 °C à + 600 °C environ.



CONDENSEUR
POUR BIOXYDE DE CHLORE
TITANE UT 40

3 - PRINCIPALES UTILISATIONS

Du fait des productions croissantes et des prix décroissants, les emplois où le titane devient un matériau économique se sont multipliés. Actuellement la construction aéronautique et spatiale (moteurs, cellules et engins) qui a été à l'origine de l'emploi du titane et de ses alliages reste le moteur de son développement.

Les autres principaux domaines où le titane et ses alliages ont trouvé une utilisation étendue sont les industries du chlore et de la soude, de la pâte à papier, des engrais, de la production d'acétaldéhyde et de la manutention de l'acide nitrique.

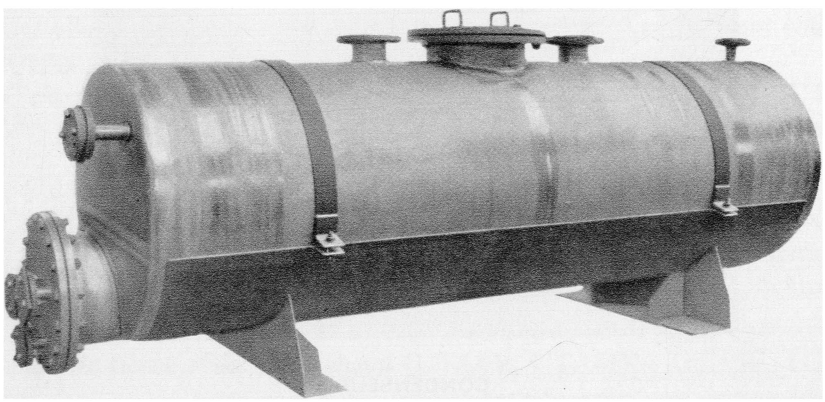
Chlore et Soude

L'industrie du chlore représente certainement le marché potentiel le plus étendu pour les produits manufacturés en titane. Pour la manutention de la saumure, et plus spécialement de la saumure contenant du chlore, le titane constitue le matériau de construction idéal.

Dans les cellules à chlore elles-mêmes, des revêtements en titane ont été utilisés pour réduire les frais d'entretien. Le chlore humide sortant de l'électrolyseur peut être véhiculé dans des tubes et échangeurs de chaleur en titane.

Enfin, des essais concluants ouvrent désormais d'importantes perspectives pour le constructeur des anodes mêmes servant à la production électrolytique du chlore. Ces nouvelles anodes permettent :

— une diminution du prix de revient du chlore,
— une augmentation de la production par m^2 de plancher,
— une économie de puissance (inter-électrode constante),
— un entretien réduit,
— des produits (chlore et soude) plus propres.



RÉSERVOIR EN TITANE UT 40

Pâte à papier

Par suite des conditions opératoires devenues plus agressives (augmentation des températures, milieux plus acides) le titane est actuellement largement utilisé dans les industries du blanchiment de la pâte à papier au bioxyde de chlore. Il a ainsi progressivement remplacé les mélangeurs en Hastelloy C dont la durée de vie était de 3 à 5 ans; des mélangeurs en titane, en épaisseur quatre fois plus faible, ont des durées de vie dépassant 10 ans, avec un entretien moindre.

Il est également utilisé sous forme de tubes, pompes, dessicateurs, etc.

Engrais

Une méthode économique des productions du nitrate de potassium est basée sur l'oxydation du chlorure de nitrosyle par l'acide nitrique concentré. La phase gazeuse est constituée par un mélange de chlore, chlorures de nitryle et de nitrosyle et du peroxyde d'azote. La phase liquide est une solution de nitrate de potassium contenant 60 % d'acide nitrique et des teneurs variables en chlore. De plus, la température peut monter jusqu'à 150 °C et la pression est variable.

Une installation récente montre que, dans ce cas, le titane a été utilisé avec succès dans le réacteur principal, la colonne d'extractions des chlorures, vaporiseurs d'acide nitrique et la plupart des tuyauteries.

Acétaldéhyde

Une des plus importantes applications du titane dans l'industrie chimique est la production de l'acétaldéhyde par oxydation directe de l'éthylène.

Dans ce procédé, l'éthylène réagit avec du chlorure cuivrique et de l'eau pour donner de l'acétaldéhyde, de l'acide chlorhydrique et du chlorure cuivreux; celui-ci est régénéré dans le milieu même, par addition d'acide chlorhydrique et d'oxygène.

Dans ce cas, le titane est pratiquement le seul matériau métallique non revêtu qui résiste à la corrosion.

Ceci constitue également un bon exemple pratique dans lequel le titane résiste à l'acide chlorhydrique, en présence de sels oxydants.

Acide nitrique

Le titane est essentiellement utilisé dans les solutions concentrées et chaudes en particulier dans les échangeurs de chaleur, éléments chauffants, etc. Il est utilisé pour la manutention et le stockage de l'acide nitrique pur (réactif chimique) où la contamination en fer ne peut être tolérée.

Eau de mer

Le titane **n'est pas attaqué par l'eau de mer et les atmosphères marines.** Des éprouvettes immergées pendant 18 ans n'ont simplement subi qu'une décoloration superficielle. Un développement important est prévisible pour

l'avenir du fait des études en cours pour le dessalement de l'eau de mer et la navigation ou explorations sous-marines.

Autres applications

Il existe de nombreux autres domaines où le titane trouve des applications par suite de ses bonnes propriétés de résistance à la corrosion. Cela va de la prothèse chirurgicale osseuse aux montages d'oxydation anodique ou paniers de bains de nickelage en passant par les industries alimentaire, photographique, pétrochimique, la protection cathodique des ouvrages, etc. Il est vraisemblable que, dans tous ces secteurs, les applications seront de plus en plus nombreuses.

Le titane et certains de ses alliages ont également leur emploi aux températures cryogéniques, en général jusqu'à — 200 °C.

Nuances employées

Ce sont les nuances de titane non allié UT35 et UT40 qui sont le plus largement employées dans les industries chimiques :

— tôles pour la fabrication des réservoirs,
— tubes et plaques pour les échangeurs,
— pièces forgées pour les brides, les plaques, les vannes, les robinets,
— barres pour diverses pièces mécaniques telles que agitateurs, centrifugeuses, etc.

La qualité UT35 est conseillée pour résoudre les problèmes d'emboutissage ou de pliage à angles vifs.

La qualité UT40 sera la nuance standard pour la plupart des appareils.

La nuance UT35 P à 0,2 % de palladium trouve son application dans le cas des milieux tantôt oxydants, tantôt réducteurs.

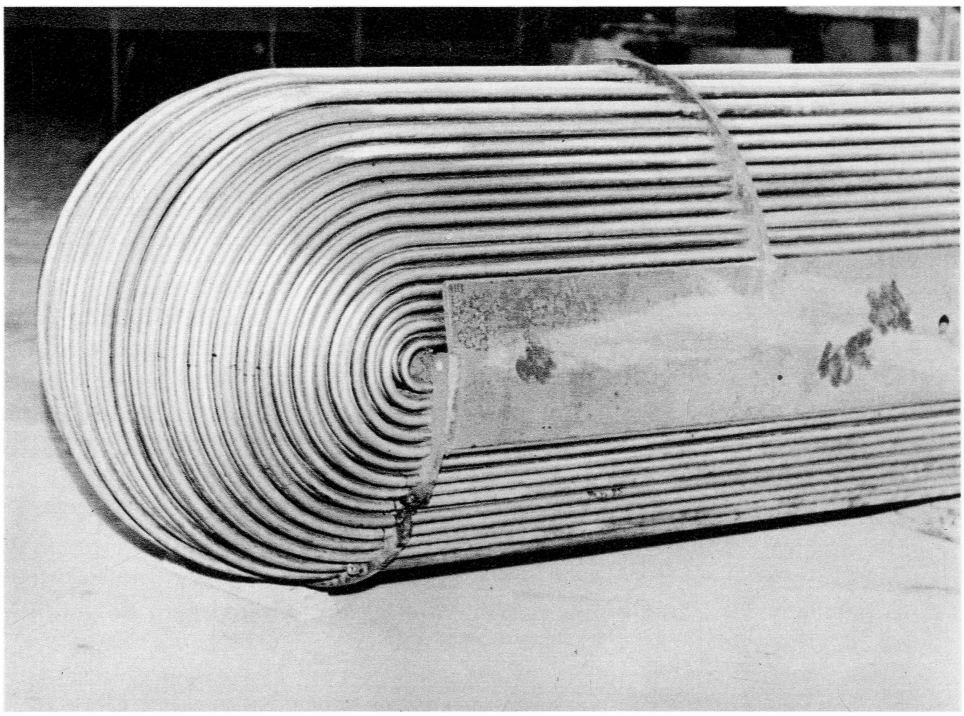
Enfin, pour les applications électrochimiques telles qu'électrolyse ou protection cathodique, il est utilisé du titane revêtu d'une très fine pellicule de platine (quelques microns). Le platine facilite le passage du courant dans le milieu et le titane sous-jacent résiste à la corrosion, en cas de discontinuité accidentelle de cette couche de platine.

Pour toutes précisions sur l'emploi du titane et de ses alliages, il y a lieu de s'adresser au service « Titane » d'UGINE KUHLMANN - 10, rue du Général Foy - Paris-8e (tél. 387-31-00 - poste 3283) ou à une agence régionale (liste page 191).

4 - MISE EN ŒUVRE

Les nuances destinées à l'industrie chimique, comportant des appareillages généralement chaudronnés, doivent posséder deux qualités essentielles :

— une bonne soudabilité,
— une bonne conformabilité à froid.



FAISCEAU TUBULAIRE EN TITANE UT 40

C'est pour cette double raison que le titane non allié (avec palladium) du type UT35 ou UT40 représente la majorité des fournitures dans ce domaine. De plus, il peut facilement être obtenu sous diverses formes telles que barres, tôles, tubes, plaques, bandes, fils et profilés, etc.

Il faut également remarquer que, par suite de sa structure monophasée, le coefficient de joint est voisin de 100 %. En outre, la résistance à la corrosion du cordon et de la zone affectée par la chaleur est la même que celle du métal de base; ces zones ne souffrent donc pas de corrosions localisées. Étant donné l'inexistence pratique de corrosions galvaniques, les ensembles soudés en titane peuvent être assemblés avec d'autres ensembles de nature différente, sans recourir à l'isolation électrique des différentes parties.

Dans certains cas où la construction doit être épaisse, par exemple en raison de pressions élevées, on peut employer le titane comme revêtement d'une structure en acier ordinaire ou inoxydable. L'incompatibilité de soudage peut conduire à l'emploi de techniques d'assemblage particulières. Nous pouvons, sur demande, conseiller les utilisateurs sur ce point.

Pour des raisons de sécurité ou de difficultés de mise en œuvre, on préférera souvent une construction homogène en titane. Des réacteurs ont utilisé plus de 30 tonnes de titane et rien n'indique qu'il s'agisse là d'une limite.

a) **Conformation.**

Si, du point de vue des caractéristiques mécaniques, le titane non allié, comme UT40, rappelle celles de l'acier doux et les alliages de titane du type UTA6V les aciers alliés de traitement, trois différences essentielles les distinguent :

Écrouissage : Le titane s'écrouit modérément et une réduction de section de l'ordre de 15 % pour un UT40 fait passer la charge de rupture de 40 à 55 hbar.

Module d'élasticité 11.000 hbar environ : Il est donc moitié de celui de l'acier. Autrement dit, à contrainte égale, le titane se déforme deux fois plus, ou encore à déformation égale, le titane subit une contrainte de moitié. Pour obtenir une déformation permanente résiduelle, il faut faire subir au titane un allongement double de celui qui est nécessaire pour un acier de même limite élastique. C'est un **matériau flexible.**

Aptitude au grippage : Les opérations de conformation à froid et notamment les opérations d'emboutissage nécessitent une lubrification abondante. Il existe à cet effet dans le commerce des produits spéciaux. L'utilisation d'un vernis pelable joint à une bonne lubrification assure le maximum de garantie contre le grippage.

Compte tenu de ce qui précède, les nuances douces de titane non allié, telles que UT35 se conforment sans difficulté. Le pliage est aisé et peut se faire presque à angle vif sans fissuration. Le retour élastique est important et pourra nécessiter une correction des outillages. L'emboutissage même profond est possible sous réserve d'une bonne lubrification.

Pour le UT40 ou le UT50, le pliage à angle vif n'est plus possible. Des rayons de 2 fois l'épaisseur sont nécessaires. En emboutissage il sera également prudent de ménager des rayons assez importants, de l'ordre de 5 à 6 fois l'épaisseur.

Pour le UT60, le pliage sera fait sur des rayons de 2,5 à 3 fois l'épaisseur.

Enfin, pour des nuances alliées telles que UTA6V ou UTA5E, il sera nécessaire de tiédir le métal dans le domaine 300/500 °C pour plier ou emboutir.

De toute façon et quelle que soit la nuance, il faut prendre soin, avant toute transformation, d'éviter les rayures profondes qui sont des amorces de fissures auxquelles le titane est sensible.

La conformation à chaud, quand elle devient nécessaire, doit être conduite avec soin, étant donné les propriétés spécifiques du métal (mauvaise conductibilité thermique, pouvoir émissif élevé, dangers de contamination par les gaz et la vapeur d'eau, faible déformabilité à chaud de sa structure à froid).

Nous recommandons de nous consulter pour ce qui concerne le réchauffage dans les fours, l'utilisation des outils et les températures de dégrossissage et de finition.

b) **Décapage.**

Le décapage a un double rôle :

— améliorer l'état de surface,

— éliminer la couche d'oxyde.

Si la couche d'oxyde est épaisse (pièces ayant subi des maintiens à plus de 600 °C, par exemple pour le forgeage), il est indiqué d'effectuer d'abord un sablage ou un décapage au bain soude-nitrate (le bain de soude pure ou additionnée d'hydrure de sodium est à déconseiller parce qu'il charge le titane en hydrogène), ensuite décapage par immersion dans un bain nitrofluorhydrique.

Le décapage au bain de soude avec 5 % de nitrate de potassium fait à 450 °C durant 15 à 30 minutes suivant les nuances, nécessite une installation spéciale et il convient de prendre des précautions pour éviter l'inflammation. C'est pourquoi il est conseillé, chaque fois que cela est possible, d'utiliser le sablage avec un abrasif fin de préférence au bain soude-nitrate.

Si la couche d'oxyde est mince, peut être utilisé seul le décapage nitrofluorhydrique (20 % d'acide nitrique + 2 % d'acide fluorhydrique à 65 °C - en poids).

PLATEAU A CLAPETS DE COLONNE DE DISTILLATION
TITANE UT 40

c) **Soudage.**

Le titane et beaucoup de ses alliages **se soudent aisément.** Le bain est fluide et facile à conduire. Les cordons ont un bel aspect et il n'y a pas de tendance intrinsèque à la fissuration. L'apport de chaleur est facile du fait de la faible densité et de la mauvaise conductibilité thermique. Enfin, le faible coefficient de dilatation ainsi que le bas module d'élasticité sont des facteurs favorables qui tempèrent les contraintes de soudage.

En fait, le facteur qui nécessite un très grand soin est la protection contre les contaminations.

Procédé TIG classique.

C'est le procédé de base. Le matériel utilisé pour les aciers inoxydables convient à condition de respecter les précautions suivantes :

1 - Buse de la torche aussi grosse que possible, diamètre de 20 mm recommandé, afin de couvrir le bain avec un flux gazeux abondant sans faire appel à des vitesses élevées. Éviter les effets de trompe susceptibles d'entraîner des tourbillons d'air.

2 - Arc court et électrode de tungstène aussi peu sortie de la torche que possible.

3 - Gaz de protection, l'argon aussi pur et sec que possible. L'argon U est souhaitable. L'hélium, quand il est disponible, est également utilisé.

4 - Circuit de gaz sec, purgé et étanche.

5 - Protection de la zone chauffée pendant le refroidissement jusqu'à environ 400 °C par un traînard, afin de couvrir le bain et la zone affectée par la chaleur d'une nappe d'argon non turbulente.

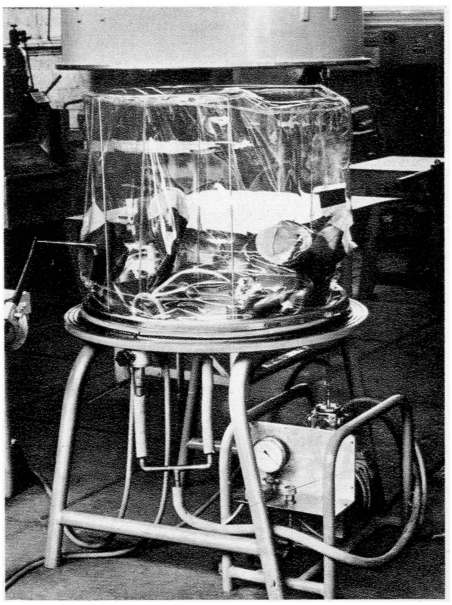
Le traînard doit être bien conçu en fonction de la géométrie de la soudure à réaliser. Tout effet de turbulence est à proscrire et pour cela il convient de briser le jet d'argon à son arrivée dans le traînard. En soudage automatique, le traînard peut être solidaire de la torche car la régularité du mouvement le permet.

En soudage manuel, il semble préférable de faire avancer le traînard par un aide. Le soudeur est alors plus libre de ses mouvements et l'aide peut à tout moment veiller à ce que le traînard reste parallèle au cordon.

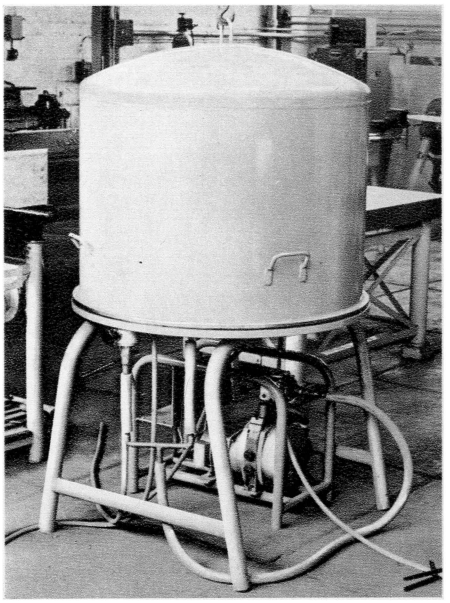
6 - Protection envers. Un diffuseur n'est pas nécessaire et une simple rainure dans le soutien de montage est suffisante pour amener l'argon. Par contre, prévoir une alimentation d'argon indépendante.

7 - Refroidir la zone chauffée par des masses de cuivre. Si l'on soude en montage, ce sont les plaques de fixation qui doivent être bien jointives. Ces plaques doivent être assez éloignées du cordon, 25 mm environ, afin d'éviter les contaminations par le cuivre.

8 - Maintenir la protection argon par temporisation après coupure de l'arc sur le cordon et le fil d'apport.



position de travail



position de purge

ENCEINTE SOUPLE POUR PROCÉDÉ TIG EN BOITE A GANTS

9 - Ajuster les débits d'argon. Ce réglage se fait généralement sur échantillons et varie peu de :

- 7 à 10 litres/minute pour la torche,
- 10 à 25 litres/minute pour le traînard suivant sa longueur,
- 2 à 4 litres/minute pour l'envers.

Dans ces conditions et en soudage manuel, des soudeurs expérimentés réalisent deux mètres réels de soudure à l'heure en une passe. En soudage automatique, le rendement est évidemment meilleur.

Procédé TIG en boîte à gants.

Il s'agit le plus souvent d'une enceinte remplie d'argon où les éléments à souder et la torche sont enfermés, l'opérateur se trouvant à l'extérieur.

Il existe plusieurs types de boîtes à gants :

— enceinte rigide résistant au vide avant remplissage d'argon,
— enceinte définitivement remplie d'argon avec circuit continu d'épuration et sas de manœuvre purgeable au vide,
— enceinte souple en matière plastique transparente, gonflable à l'argon et purgeable au vide sous cloche métallique rigide.

Dans la pratique courante, les boîtes à gants sont d'un volume inférieur au m^3, ce qui en limite l'utilisation à des cas particuliers.

L'emploi de ce procédé doit être considéré comme complémentaire du soudage TIG à l'air quand la forme des soudures est complexe et ne peut pas s'adapter à une réalisation simple de traînard et de protection envers.

Procédé MIG.

Ce qui a été dit pour le procédé TIG s'applique au procédé MIG. Il est surtout réservé aux épaisseurs à souder supérieures à 2 mm environ. Les traînards doivent être plus longs que dans le TIG, l'échauffement étant plus important.

Il existe également d'autres techniques d'assemblage telles que le soudage par résistance (par points ou à la molette), par étincelage, par bombardement électronique, sous flux, etc. ainsi que le brasage sous vide ou sous argon (avec décapage préalable).

Qualité des soudures

Une soudure parfaitement pratiquée présente un cordon blanc brillant et la zone affectée par la chaleur n'est pas colorée. Les deux principaux défauts peuvent être la contamination et les soufflures.

- *La contamination*, due à de mauvaises conditions de protection est contrôlée, quantitativement par des essais de pliage ou de dureté et qualitativement par la coloration de l'assemblage.

On tolère généralement un cordon jaune paille avec quelques bleuissements de la zone affectée par la chaleur, alors qu'une soudure est déjà estimée correcte si le cordon est blanc brillant et la zone jaune paille. Un cordon bleu est suspect.

- *Les soufflures* sont révélées par radiographie et il est difficile de les éviter complètement; elles résultent de phénomènes physico-chimiques où interviennent probablement l'hydrogène et l'oxygène, suivant des mécanismes encore mal connus. On leur fixe en général des limites conventionnelles de taille et de densité.

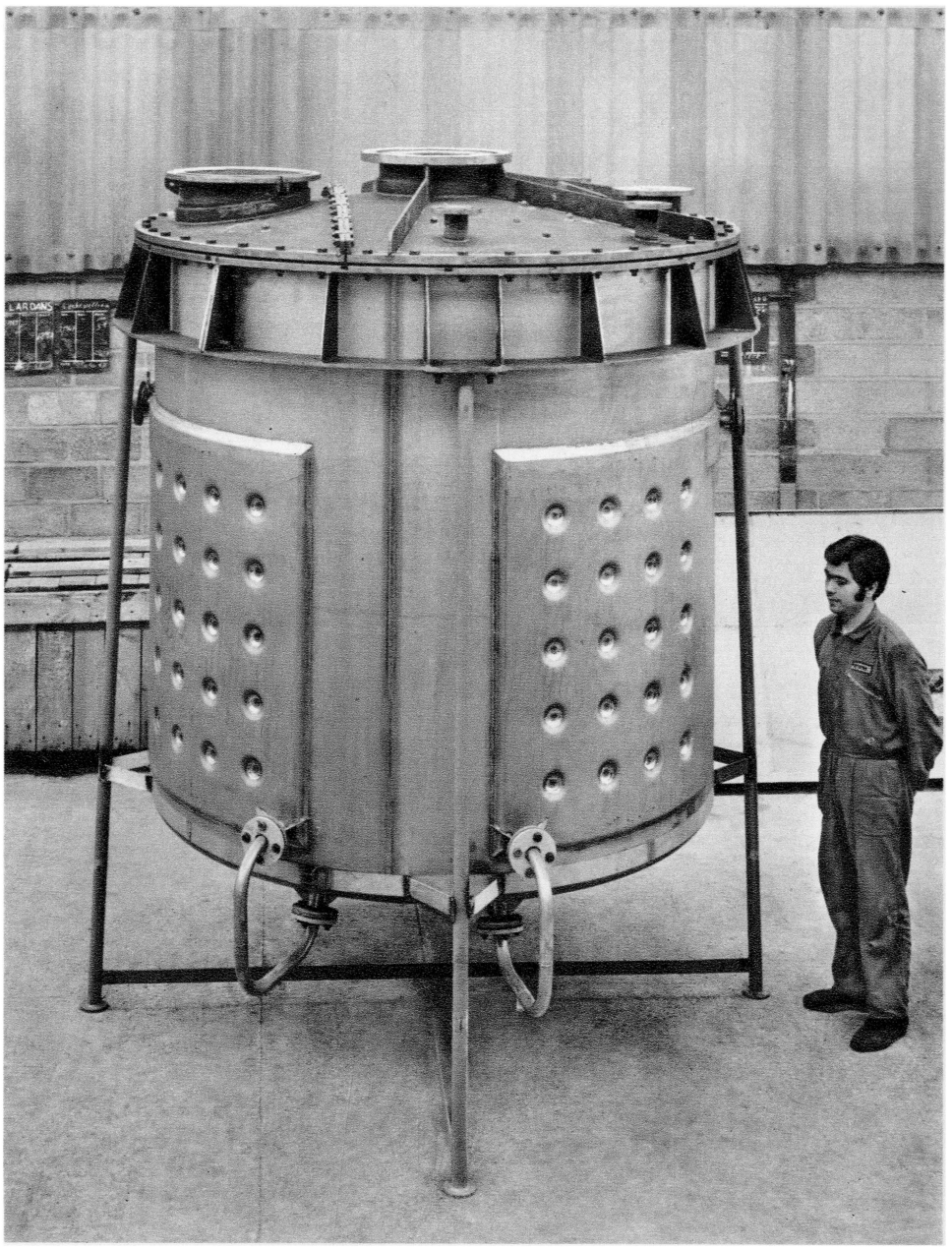
Précautions à prendre avant soudage

Les éléments à souder ne doivent pas être pollués par les opérations de découpage. Il faut utiliser le sciage ou le cisaillage car l'oxycoupage est dangereux, et également dégraisser soigneusement, de préférence à l'acétone, et dans certains cas décaper juste avant soudage.

Les bords préparés doivent être limés pour en extraire les bavures qui sont des pièges à air et à pollution solide.

Ces précautions sont les mêmes que celles requises pour les aciers inoxydables. Le degré de soin est seulement plus grand.

On ne répare pas une soudure défectueuse par décapage ou par traitement thermique. Il faut la détruire par des moyens mécaniques et la refaire.



RÉACTEUR AVEC PANNEAUX DE RÉCHAUFFAGE
Titane UT 40 (couvercle en acier doublé de titane)

Septième partie

RENSEIGNEMENTS UTILES

DÉTECTEUR DE RUPTURE DE GAINE POUR RÉACTEUR
D'UNE CENTRALE ATOMIQUE
ACIER 18-10 (NS 22 S)

Chapitre XXIII

AGENCES DE VENTE ET MAGASINS

Produits disponibles

Les aciers inoxydables élaborés par UGINE KUHLMANN sont mondialement connus sous le label « UGINOX ». Les produits longs : barres, fils, etc., ainsi que les pièces sont vendus d'usine et de stock par la Division « Aciers Spéciaux » de la Société. En ce qui concerne les tôles, les lingots produits par UGINE KUHLMANN sont transformés par les FORGES DE GUEUGNON en tôles, feuillards, disques, etc., et commercialisés pour les livraisons d'usine par la Société UGINE-GUEUGNON, 16, rue d'Artois à Paris 8e.

Les magasins de vente d'aciers inoxydables d'UGINE KUHLMANN, dont on trouvera ci-après la liste avec l'adresse des agences, tiennent à la disposition de leur clientèle un large stock de tôles et feuillards.

Pour être renseigné de façon détaillée sur les aciers et alliages inoxydables, sur les autres aciers spéciaux, sur le titane et ses alliages (tant sur les nuances disponibles en magasin que sur les caractéristiques techniques) ou sur nos spécialités (fils de soudure, boulons, vis, etc.), il suffit de poster la carte-réponse ci-incluse énumérant les documents disponibles.

	AGENCES	MAGASINS
DIJON	2, rue Mably Tél. (80) 32.45.77 Télex UGIDIJON 35.631	
GRENOBLE	12, rue du Drac Tél. (76) 96.68.90 Bureau à CLUSES Tél. (79) 10.41	Mêmes adresse et téléphone et COMPTOIR INDUSTRIEL DU FAUCIGNY 74-CLUSES - Tél. (79) 10.39
LILLE	31 bis, rue Casimir-Delavigne Tél. (20) 54.78.97 Télex UGILIL 81.765	Mêmes adresse, téléphone et télex
LYON	211, avenue de Pressensé VÉNISSIEUX Tél. (78) 74.23.22 Télex UGILYON 33.195	Mêmes adresse, téléphone et télex
MARSEILLE	131, boulevard de la Barasse (11e) Tél. (91) 42.88.78 Télex UGIMARS-MARSL 42.224	Mêmes adresse, téléphone et télex

	AGENCES	MAGASINS
MULHOUSE	65, rue de Dunkerque MULHOUSE- BOURTZWILLER Tél. (89) 46.28.27 Télex UGIMUL-MULHS 87.901	Mêmes adresse, téléphone et télex
NANCY	48 bis, rue Gabriel-Mouilleron Tél. (28) 53.18.60 Télex UGINANCY 85.091	A.I.D.E. 83, rue Victor Tél. (28) 52.74.63
NANTES	93, route de Vannes Tél. (40) 74.05.94	Mêmes adresse et téléphone
PARIS	39, rue Pleyel 93-SAINT-DENIS Tél. 243.01.23 Télex UGINE-STDENI 21.966	Mêmes adresse, téléphone et télex
ROUEN	29, allée Eugène-Delacroix Tél. (35) 71.45.13	Éts VERPILLOT 41, rue Thiers Tél. (35) 70.29.55
SAINT-ÉTIENNE	4, rue Désiré-Claude Tél. (77) 33.33.63 Télex UGISTEN-STETN 33.625	S.A.M.I. 26, rue Barrouin Tél. (77) 32.62.48
THIERS	13, rue Marx-Dormoy Tél. (73) 969	Mêmes adresse et téléphone
TOULOUSE	39, route de Paris 31-LACOURTENSOURT par AUCAMVILLE Tél. (61) 85.92.08 Télex UGITOUL 51.702	Mêmes adresse, téléphone et télex et à BORDEAUX : S.A.F.I.M. 60, avenue E.-Counord Tél. (56) 29.66.87

Chapitre XXIV

UNITÉS DE MESURE

La Division " Aciers Spéciaux " d'UGINE KUHLMANN a rassemblé dans cet ouvrage tout ce qui concerne les questions techniques intéressant la construction chaudronnée en acier inoxydable, pour que les chaudronniers ayant besoin d'étudier un problème aient en main des éléments qui les aident à trouver la meilleure solution.

Or, tout utilisateur a souvent besoin de disposer d'un certain nombre d'informations chiffrées, concernant les matières premières utilisées dans sa profession ou se rapportant à des données techniques classiques et constantes, nécessaires pour ses études.

Ce chapitre comprend donc des tableaux de renseignements, répartis en quatre groupes, qui constituent pour les techniciens une documentation immédiatement à leur portée.

Il ne comporte pas de renseignements détaillés sur les nuances UGINE d'aciers inoxydables. Les tableaux de la première partie ont donné les renseignements de base sur les principales d'entre elles utilisées en chaudronnerie. Pour avoir des indications techniques complètes sur chacune de ces nuances ou sur celles ne figurant pas sur ces tableaux, tant sur leur comportement métallurgique que sur leur utilisation, il suffit de demander au Service « Documentation » de la Division " Aciers Spéciaux " d'UGINE KUHLMANN, les notices se rapportant à ces nuances ou l'ensemble des notices concernant soit les aciers inoxydables courants pour travail à froid, soit les aciers et alliages utilisés aux températures élevées.

Système international

En 1960 a été adopté un système international des unités de mesure pour simplifier ceux existant auparavant. Ce système, officialisé en France par un décret du 3 mai 1961 (Journal Officiel du 20 mai 1961 et rectificatif J.O. du 11 août 1961), modifié par décret du 5 janvier 1966 au J.O. du 7 janvier 1966, a pris comme unités de base :

— le mètre pour la longueur : m
— la seconde pour le temps : s
— le kilogramme pour la masse : kg
— l'ampère pour l'intensité de courant électrique : A
— la candela pour l'intensité lumineuse : cd
— le degré Kelvin pour la température : ^{o}K

Dans la vie courante, c'est le degré Celsius (°C) qui est utilisé; il est égal en valeur absolue au degré Kelvin (°K) mais le chiffre de température est différent car le zéro de l'échelle Kelvin est le zéro absolu de température et le zéro de l'échelle Celsius est la température de la glace fondante; on a en conséquence $t\ °C = (T - 273{,}15)\ °K$.

Ce système de mesures, obligatoire en France, comporte des unités secondaires, en particulier pour la force : le newton (N), et pour la contrainte et la pression : le pascal (Pa).

Le newton est la force qui communique à un corps ayant une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 mètre/seconde, par seconde.

Le pascal est la contrainte qui, agissant sur une surface plane de 1 mètre carré, exerce sur cette aire une force totale de 1 newton.

La formation des multiples et sous-multiples des unités résulte des tableaux suivants :

MULTIPLES

FACTEUR par lequel est multipliée l'unité	PRÉFIXE à mettre avant le nom de l'unité	SYMBOLE à mettre avant celui de l'unité
10^{12} soit 1 000 000 000 000	téra	T
10^{9} soit 1 000 000 000	giga	G
10^{6} soit 1 000 000	méga	M
10^{3} soit 1 000	kilo	k
10^{2} soit 100	hecto	h
10^{1} soit 10	déca	da

SOUS-MULTIPLES

FACTEUR par lequel est multipliée l'unité	PRÉFIXE à mettre avant le nom de l'unité	SYMBOLE à mettre avant celui de l'unité
10^{-1} soit 0,1	déci	d
10^{-2} soit 0,01	centi	c
10^{-3} soit 0,001	milli	m
10^{-6} soit 0,000 001.....	micro	μ
10^{-9} soit 0,000 000 001	nano	n
10^{-12} soit 0,000 000 000 001	pico	p
10^{-15} soit 0,000 000 000 000 001.....	femto	f
10^{-18} soit 0,000 000 000 000 000 001 ..	atto	a

a) Unité de force:

Dans ce système international où le kilogramme est l'unité de masse, le terme kg n'est plus admis en tant qu'unité de force.

Le kilogramme-force (kgf) est considéré comme une unité non cohérente par rapport au système international.

Cependant, le décret du 3 mai 1961 sur les unités légales en France et sa circulaire d'application en date du 29 décembre 1961 prévoient que l'emploi des anciennes unités pratiques dérivées du kilogramme-force sera toléré, c'est-à-dire que par exemple le kilogramme-force par mm^2 (kgf/mm^2) peut être utilisé dans la terminologie courante.

La force dérivant de la formule :

force = masse × accélération

on a :

1 newton = 1 kilogramme × 1 mètre/seconde ^{2}

donc :

force-poids = masse × accélération de la pesanteur

et :

1 kilogramme-force = 1 kilogramme × 9,80665 m/s^2 = 9,80665 newton.

C'est-à-dire que le kilogramme-force vaut 0,98 décanewton (daN) et que le décanewton vaut 1,019716 kilogramme-force, soit 1,02 kgf.

b) Unité de pression:

La pression s'exprime par la formule :

pression = force de pression/surface.

L'unité cohérente du système international est donc le newton par mètre carré : N/m^2 ou pascal : Pa.

Pour faciliter les calculs, on a adopté le bar = 10^5 newton/m^2 = 10^5 Pa, correspondant à la pression atmosphérique normale, d'où :

1 bar = 10^5 N/m^2 = 1 décanewton/cm^2
= 1,019716 kgf/cm^2
= 1,019716 atmosphère (at), terme ancien abandonné.

Dans la pratique, on utilise l'unité hectobar (hbar) qui diffère du kgf/m^2 de 2 %. Exactement :

1 hbar = 1,019716 kgf/mm^2 = 1 kilonewton/cm^2
et 1 kgf/mm^2 = 0,980065 hbar.

Nota : Le bar équivaut à l'hectopièze, multiple décimal de l'unité du système MTS. La pression atmosphérique normale (0,76 mètre de mercure à 0 °C, sous l'accélération normale de la pesanteur 9,80665 m/s^2) est égale à 101.325 pascals.

c) Bien entendu, sont déduites des unités internationales les unités de travail et d'énergie, de quantité de chaleur, de puissance, etc.

Ainsi, d'après la relation :

travail = force × distance effectuée

l'unité cohérente de travail et d'énergie est le joule et :

1 joule (J) = 1 Newton par mètre (Nm)

soit 0,10197 kilogramme par mètre, donc 1 kilogrammètre (kgm).

L'unité de quantité de chaleur est aussi le joule et l'unité de puissance est le watt qui vaut 1 joule par seconde.

Il faut signaler que le décajoule et le kilogrammètre (kgf.m) diffèrent d'environ 2 % puisque :

1 décajoule (daJ) = 10 Newton mètre (Nm)
= 1,019716 kgf.m soit 1,02 kgf.m

et que 1 kgf.m = 0,98 daJ.

Unités anglo-saxonnes

La Grande-Bretagne et les États-Unis d'Amérique utilisent souvent un système non métrique. Les U.S.A. ont adopté, dès l'origine, le système métrique. Le pouce américain est rattaché au mètre étalon et vaut exactement 25,4 mm. Le pouce anglais est la douzième partie du pied étalon et vaut approximativement 25,39993. Le tableau ci-après donne les principales unités anglo-saxonnes appelées encore mesures anglaises et les coefficients qui permettent de passer des mesures métriques aux mesures anglaises et réciproquement.

Pour la température, seul le degré centigrade est actuellement légal tant dans le Royaume-Uni qu'aux U.S.A.

Cependant, le système anglo-saxon utilise aussi, au lieu du degré Celsius, le degré Fahrenheit (°F), mais n'utilise pratiquement plus le degré Rankine (°R) partant du zéro absolu. Les deux degrés (degré R ou degré F) sont identiques en valeur; on passe des degrés Fahrenheit aux degrés Celsius par la formule °C = (°F — 32) 5/9.

La température de 0 °C correspond en effet à 32 °F et, bien entendu, le zéro Kelvin est le zéro Rankine.

Les *unités de longueur* sont :

1 yard = 3 pieds (feet) = 36 pouces (inches) et 1 mile = 1760 yards
1 pole = 5,5 yards
1 furlong = 40 poles = 220 yards

Leur correspondance avec les unités métriques a été ainsi normalisée :

1 yard (yd) = 0,9144 m
1 inch (in) = 25,4 mm
1 mile terrestre (m) = 1,6093 km

et ces valeurs sont utilisées également en Irlande, au Canada, en Afrique du Sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Les *unités de surface* sont :

1 square inch (pouce carré) = 6,45 cm^2
1 square foot (pied carré) = 9,2903 dm^2 = 929,03 cm^2
1 square yard (aune carrée) = 0,8361 m^2
1 square pole = 30,25 squares yards = 25,292 m^2
1 rood = 40 squares poles = 10,12 ares
1 acre (4 roods) = 40,468 ares
1 square mile (mille carré) = 640 acres = 259 ha

Les *unités de volume* sont :

1 cubic inch (pouce cube) = 16,386 cm^3
1 cubic foot (pied cube) = 1.728 pouces cubes = 28,315 dm^3
1 cubic yard (aune cube) = 27 pieds cubes = 0,7645 m^3

Pour les *unités de masse* la livre anglaise est :

1 pound (lb) = 16 ounces (oz) = 7.000 grains (gr)

et l'on a :

1 grain = 0,064799 g
1 pennyweight = 1,555 g
1 ounce (once) = 28,349 g
1 pound (livre) = 453,592 g
1 quarter (28 livres) = 12,700 kg
1 hundredweight (cwt, quintal) = 4 quarters = 50,802 kg
1 long ton (tonne longue) = 20 cwt = 1016,047 kg

De plus, aux États-Unis d'Amérique :

1 short hundredweight = 100 pounds = 45,359 kg
1 tonne courte (short ton US) = 2.000 pounds = 907,185 kg
1 tonne longue anglaise ou 1 tonne longue US = 2.240 pounds

c'est-à-dire que :

1 short ton US = 1 long ton UK × 0,89286

Pour les *unités de force*, les kilogrammes-force/mm^2 se comparent à la livre par pouce carré (pound per square inch = psi) ou à la tonne par pouce carré (t/sq.in) et les équivalences sont :

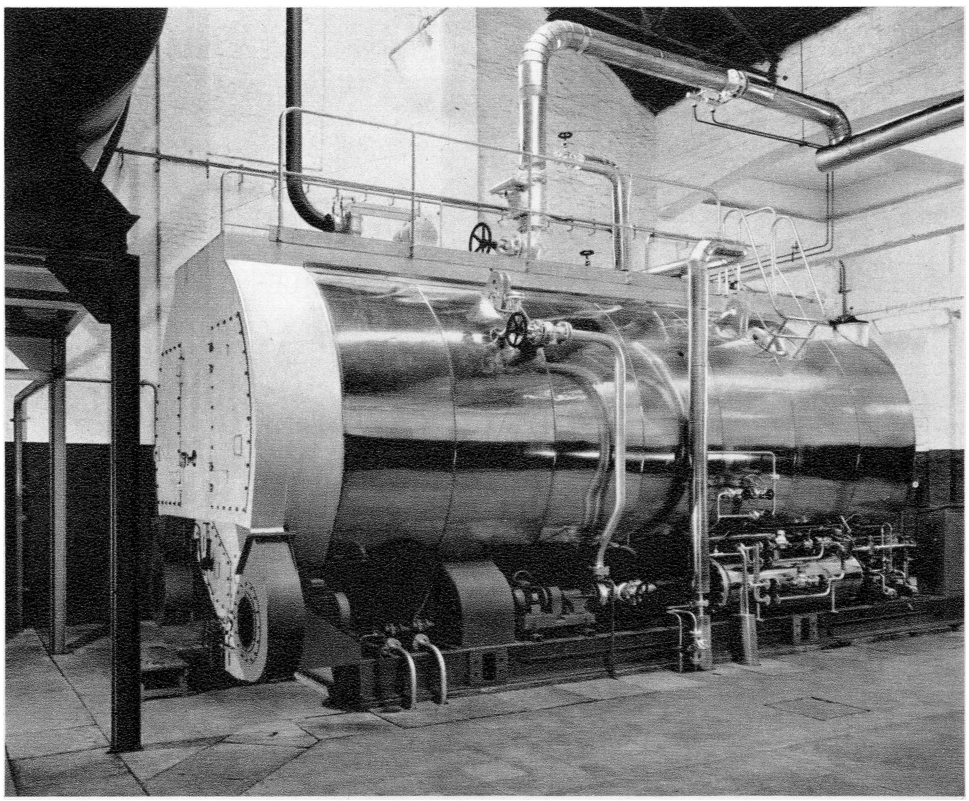
1 kgf/mm^2 = 1.422,3 psi = 0,635 t/sq.in
1 livre par pouce carré (psi) = 0,000703 kgf/mm^2 soit 0,07 kgf/cm^2
1 livre par pied carré = 0,000488 kgf/cm^2
1 livre par yard carré = 0,000054 kgf/cm^2
1 tonne longue anglaise par pouce carré = 1,5749 kgf/mm^2 = 157,49 kgf/cm^2
1 tonne courte par pouce carré = 160,613 kgf/cm^2
1 tonne longue anglaise par pied carré = 0,01013 kgf/mm^2

Par rapport aux hectobars on a :

1 livre par pouce carré (psi) = 0,0006894 hbar
1 hbar = 1.450,378 psi

CONVERSION DES MESURES MÉTRIQUES EN MESURES ANGLAISES			
MULTIPLIER PAR	LE NOMBRE DE	POUR OBTENIR LE NOMBRE DE	
0,03937	Millimètres	Pouces	25,399
3,2809	Mètres	Pieds	0,30479
1,0936	Mètres	Yards	0,91438
0,6214	Kilomètres	Miles	1,6093
0,5396	Kilomètres	Miles nautiques	1,85312
0,00155	Millimètres carrés	Pouces carrés	645,13
0,155	Centimètres carrés	Pouces carrés	6,451
10,7643	Mètres carrés	Pieds carrés	0,0929
15,43235	Grammes	Grains	0,0648
2,2046	Kilogrammes	Livres	0,453592
0,9842	Tonnes	Tonnes anglaises	1,0160475
1,10231	Tonnes	Tonnes américaines	0,9071853
0,9863	Chevaux vapeur	H. P.	1,0139
	POUR OBTENIR LE NOMBRE DE ↑	MULTIPLIER LE NOMBRE DE ↑	PAR ↑
CONVERSION DES MESURES ANGLAISES EN MESURES MÉTRIQUES			

Le tableau D3 page 238 donne la conversion de toutes les autres unités de mesure anglaises en unités métriques et réciproquement.



REVÊTEMENT DE CALORIFUGEAGE DE CHAUDIÈRE
(Tôles à surface travaillée TST 1 en F 17)

Chapitre XXV

TABLEAUX

Pages

A — UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES..... 201

B — COMPARAISON DES CONSTANTES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX..... 217

C — RENSEIGNEMENTS MÉTALLURGIQUES..... 229

D — RENSEIGNEMENTS TECHNIQUES GÉNÉRAUX..... 237

A 1

TABLES DE CORROSION

1 - *Les tables de corrosion que nous présentons contiennent des indications générales se rapportant le plus souvent à des produits exempts d'impuretés. Ces indications ne peuvent par conséquent constituer que des* points de repère *destinés à orienter les utilisateurs en première approximation.*

A partir de tels repères, l'étude d'un problème industriel déterminé doit faire appel aux données résultant d'expériences précédentes ou découlant d'un programme d'essai conçu en fonction de l'objectif envisagé.

Notre Centre Technique de Saint-Denis, nos agents spécialisés et le Centre de Recherches Métallurgiques d'UGINE vous conseilleront utilement après avoir pris connaissance de tous les éléments du problème : nature du milieu corrosif, type de matériel prévu, mode de construction, conditions d'exploitation, etc.

2 - *D'une façon générale, différentes nuances d'acier inoxydable peuvent être utilisées dans un cas donné. Lorsque la table de corrosion n'en conseille qu'une seule, il s'agit de la moins chargée en éléments d'addition. Souvent, nous conseillons à la fois une nuance d'acier inoxydable à très bas carbone ainsi que la nuance correspondante stabilisée.*

3 - TAUX DE CORROSION

En cas de corrosion du type uniforme il est généralement admis :

Résistance excellente : colonne A
- — perte de poids $\leqslant$ 0,1 g/m²/h
- — perte d'épaisseur $\leqslant$ 0,11 mm/an

Résistance moyenne : colonne B
- — perte de poids de 0,1 à 1 g/m²/h
- — perte d'épaisseur de 0,11 à 1,1 mm/an

En cas de corrosion du type local, sous forme de piqûres par exemple, la nuance portée dans la colonne A présente le maximum de sécurité d'emploi. La nuance portée éventuellement dans la colonne B peut présenter une excellente résistance à la corrosion du type uniforme mais comporter un risque de corrosion locale. L'attention dans ce cas est attirée par un renvoi ou un astérisque.

4 - ABRÉVIATIONS :

atm. = atmosphère (pression)	sol. = solution	t.t. = toutes températures
conc. = concentré	sat. = solution saturée	+ = tendance à corrosion par piqûres
éb. = température d'ébullition	t c. = toutes concentrations	

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
A	Concentration	Température	A	B
Acétate d'aluminium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de cellulose	20%	20°	Toutes nuances	
— de cuivre	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de plomb	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— — fondu		292°	Toutes nuances	
Acéto-arsenite de cuivre (vert de Schweinfurt)	25%	20°	NS22S/NS21S	
Acétone			Toutes nuances	
Acide acétique	5%	20°	Toutes nuances sauf 13 % Cr	
— —	5%	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— —	20%	20°	Toutes nuances sauf 13 % Cr	
— —	20%	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— —	50%	20°	NS22S/NS21S	
— —	50%	éb.	NSM21S/NSMC	
— —	80%	20°	NS22S/NS21S	
— —	80%	éb.	NSM23	NSM21S/NSMC
— —	100%	20°	NS22S/NS21S	
— —	100%	éb.	NSM23	NSM21S/NSMC
Acide benzoïque	t.c.	éb.	Toutes nuances	
Acide borique	sat.	20°	Toutes nuances	
Acide butyrique	t.c.	20° à éb.	NSM21S/NSMC	
Acide carbonique	sat.	20°	Toutes nuances	
— — en gaz humide chaud			NS22S/NS21C	F17
Acide chlorhydrique sol. +	0,5%	50°	NSM21S/NSMC	
— — — +	1%	20°	NSM21S/NSMC	NSCD
— — — +	1%	50°		
— — — +	1,6%	20°	NSCD	NSMC
Acide chlorhydrique exempt oxydants +	t.c.	20°	UC87B	
Acide chlorhydrique exempt oxydants +	t.c.	éb.		UC87B
Acide chlorhydrique avec oxydants +	t.c.	20°	UC76C	
Acide chromique	10%	20°	Toutes nuances	
— —	10%	éb.	UC76C	NS22S
— —	50%	20°	UC76C	NS22S
— —	50%	éb.	UC76C	

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Acide chromique 50 % commercial (conten. SO_3)		20°	NS22S	
Acide citrique	5 %	éb.	NS22S/NS21S	
— —	10 %	20°	Toutes nuances	
— —	10 %	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— —	25 %	20°	Toutes nuances	
— —	25 %	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— —	sat.	20°	NS22S/NS21S	F17
— —	sat.	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
Acide cyanhydrique		20°	NS22S/NS21S	
Acide fluorhydrique	t.c.	t.t.		UC76C
Acide fluorhydrique + acide nitrique (bains décapage aciers inox) HF à 2 % en vol. d'ac. à 40 % + HNO_3 10 % en vol. d'ac. à 36° Bé		20°		NSM22S
		60°		NSCD
Acide formique	t.c.	20°	NSM21S/NSMC	
— —	1 à 5 %	éb.	NSM21S/NSMC	
— —	10 %	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	10 à 90 %	éb.	NSCD	
— —	100 %	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Acide gallique	t.c.	éb.	Toutes nuances	
Acide gras		20 à 150°	Toutes nuances	
— —		300°	NSM21S/NSMC	
Acide lactique +	t.c.	20°	NS22S/NS21S	
— — +	10 %	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— — +	50 %	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
— — +	100 %	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
Acide malique	50 %	20°	Toutes nuances	
— —	50 %	éb.	NS21A	
Acide nitreux	conc.	20°	NS21A	
Acide nitrique	1 à 65 %	20°	Toutes nuances	
— —	1 à 65 %	60°	NS22S/NS21S	
— —	1 à 50 %	éb.	NS22S	
— —	65 %	éb.	NS22A	
— —	65 à 98 %	20°	NS22S/NS21S	
— —	65 à 90 %	60°	NS22A	
— —	> 98,5 %	25°		NS22A

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Acide oxalique	5 %	20°	Toutes nuances	
— —	5 %	éb.	NSM21S/NSMC	
— —	10 à 50 %	20°	NS22S/NS21S	
— —	t.c.	100°		NSCD
Acide phosphorique (1) + oxydants	1 à 85 %	20°	NS22S/NS21S	
Acide phosphorique (1) + oxydants	70 à 90 %	20 à 100°	NSCD	
Acide phosphorique (1) + oxydants	50 %	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
Acide phosphorique sans oxydant	1 à 50 %	20°	NS22S/NS21S	
Acide phosphorique sans oxydant	50 à 70 %	20 à 100°	NSM22S	NSM21S/NSMC
Acide phosphorique sans oxydant	70 à 90 %	20 à 80°	NSCD	
(bains industriels)				
$\frac{H_3PO_4}{70} + \frac{H_2SO_4}{20} + \frac{HNO_3}{10} + \frac{H_2CrO_4}{}$		100°	NSM21S/NSMC	
50 40 0,1 à 2 % Fe		100°	NSM21S/NSMC	
Acide picrique	t.c.	20°	Toutes nuances	
— —	10 %	éb.	Toutes nuances	
Acide pyroligneux	t.c.	20°	Toutes nuances	
Acide salicylique	10 %	20 à 100°	Toutes nuances	
Acide sulfureux	10 à 20 %	20°	NS22S/NS21S	
Acide sulfurique	0 à 10 %	20°	NSM21S/NSMC	
— —	10 à 25 %	20°	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	25 à 80 %	20°	NSCD	
— —	80 à 100 %	20°	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	0 à 4 %	60°	NSM21S/NSMC	
— —	4 à 14 %	60°	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	14 à 60 %	60°	NSCD	
— —	60 à 85 %	60°	UC87B/UC58D(2)	NSCD
— —	85 à 90 %	60°	UC87B/UC58D(2)	NSM21S/NSMC
— —	90 à 98 %	60°	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	98 à 100 %	60°	NSM21S/NSMC	
— —	0 à 3 %	80°	NSM21S/NSMC	
— —	3 à 7 %	80°	NSCD	NSM21S/NSMC
— —	7 à 45 %	80°	UC87B/UC58D(2)	NSCD
— —	45 à 94 %	80°	UC87B/UC58D(2)	

(1) *La corrosion par l'acide phosphorique de voie humide est gouvernée par les impuretés contenues.*

Il importe d'en préciser la teneur. Les impuretés oxydantes ont tendance à modérer la corrosion, les impuretés fluorées l'accélèrent.

(2) *Nuance moulée seulement.*

MILIEU D'UTILISATION	Concentration	Température	NUANCES CONSEILLÉES A	B
Acide sulfurique	94 à 100 %	80°	UC87B/UC58D(1)	NSM21S/NSMC
— —	0 à 50 %	éb.	UC87B	UC58D (1)
— + SO_2 (11 à 60 %) OLEUM		20°	Toutes nuances	
— + SO_2 (11 à 60 %) OLEUM		100°		NSM21S/NSMC
Acide sulfurique + ac. nitrique				
H_2SO_4 + HNO_3				
70 % 3 %		60°	NS22S/NS21S	
70 % 10 %		95°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
60 % 40 %		60°	NS22S/NS21S	
50 % 50 %		60°	NS22S/NS21S	
15 à 30 % 5 %		95°	NS22S/NS21S	
5 % 1 %		50°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Acide sulfurique + bichromate de potassium				
H_2SO_4 + $K_2Cr_2O_7$				
2 % 2 %		éb.	NS22S/NS21S	
10 % 5 %		30°	Toutes nuances	
Acide sulfurique + acide chromique				
H_2SO_4 + $H_2Cr_3O_7$				
20 % < 6 %		60°	NSM21S/NSMC	
20 % > 8 %		60°	NS22S/NS21S	
Acide sulfurique + sulfate de Cu				
H_2SO_4 + $CuSO_4$				
5 % 5 %		20°	Toutes nuances	
10 % 10 %		éb.	NS22S/NS21S	
Acide tannique	t.c.	20°	Toutes nuances	
— —	t.c.	éb.	NS22S/NS21S	F17
Acide tartrique	0 à 50 %	20°	Toutes nuances	
— —	20 %	éb.	NS22S/NS21S	F17
— —	sat.	100°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Acide urique		20°	NS22S/NS21S	
Alcools		20°	Toutes nuances	
—		éb.	NS22S/NS21S	
Ammoniac (gaz)		100°	Toutes nuances	
Ammoniaque	t.c.	20 à 100°	Toutes nuances	
Anhydride acétique		20°	NS22S/NS21S	F17
— —		éb.	NSM21S/NSMC	F17

(1) *Nuance moulée seulement.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Anhydride sulfureux gaz humide		< pt rosée	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— — gaz sec ...		300°	Toutes nuances	
Aniline.....		20°	Toutes nuances	
Atmosphères (1) intérieures			Toutes nuances	
— rurales			Toutes nuances	
— marines			NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— industrielles...			NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
B				
Bains photographiques			NSM21S/NSMC	
Benzine			Toutes nuances	
Benzol			Toutes nuances	
Bicarbonate d'ammonium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de potassium.....	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de sodium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Bichromate de potassium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
Bichromate de sodium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
Bière.....			NS22S/NS21S	
Bisulfate de potassium	10 %	20°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— de sodium.....	10 %	20°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Bisulfite d'ammonium d = 1,04.		éb.	NSM21S/NSMC	
— de calcium —.	conc.	20°	NS22S/NS21S	
— — —.		éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— de sodium	5 à 40 %	20°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— de potassium	10 %	20 à 90°	NS22S/NS21S	
Bitartrate de potassium.....	sat.	100°		NSM21S/NSMC
Borax (borate de sodium).....		100°	Toutes nuances	
Bouillie bordelaise (chaude)....			NS21A	
Brome sec pur		20°	UC76C/UC87B	
— humide		20°	UC76C	
Bromure d'argent +.....	10 %	20°	NSCD	NSM21S/NSMC
— de potassium +.....	10 %	80°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— de sodium + ...	10 %	80°	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S

(1) *La résistance aux atmosphères est d'autant meilleure que le métal est mieux poli. A l'extérieur des bâtiments, il convient d'effectuer un nettoyage périodique.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
C	Concentration	Température	A	B
Café		éb.	Toutes nuances	
Camphre			Toutes nuances	
Carbonate d'ammonium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de magnésium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— — fondu				UC76C
— de sodium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	•
— — fondu				UC76C
Chaux	sat.	éb.	NS22S/NS21S	
Chlorate de potassium	sat.	éb.	NS22S/NS21S	
Chlorate de sodium +				
30 % + ClNa 5 %		éb.	NSM21S/NSMC	
35 % + sat. ClNa +		100°	UC76C	
Chlore (gaz) sec		20 à 100°	NS22S/NS21S	
— humide		20°	UC76C	
— (sol.) +	0,1	20°	NSM21S/NSMC	
Chlorite de sodium + pH 3,5	2 g/l	60°	NSM22S poli	NSMC poli +
— —	20 g/l	20°	NSM22S poli	NSMC poli +
— + add. sel oxydant	20 g/l	80°	NSM22S poli	NSMC poli +
Chloroforme			Toutes nuances	

Chlorures :

Il est difficile de situer la résistance à la corrosion des aciers inoxydables en présence des solutions de chlorures minéraux ou organiques. En effet, ces matériaux n'y subissent en général aucune corrosion du type uniforme permettant de les classer selon les repères A ou B de nos tableaux. Les risques principaux sont ceux de la corrosion par piqûres et de la corrosion fissurante sous tension. Ils sont naturellement dépendants des matériaux mais sont très fortement influencés par les conditions d'utilisation (pH des solutions, températures, aération, régime de contraintes, circulation, etc.). D'une façon générale, les aciers contenant du molybdène, à basse teneur en carbone sont préférés (NSM21S, NSM22S, NSM23, NSCD). Quelquefois, il est nécessaire de recourir à des alliages plus riches. Il est donc conseillé de consulter nos services techniques pour chaque cas particulier.

Choucroute		cuisson	NSM21S/NSMC	
Cidre			NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Cognac (1)			NSM21S/NSMC	
Confitures		cuisson	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
Créosote			NS21A	
Cyanogène			Toutes nuances	
Cyanure de cuivre	t.c.	t.t.	NS21A/NS21S	
— de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	

(1) *Il est nécessaire de meuler et polir les cordons de soudure.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Cyanure de potassium fondu...			NS22S/NS21S	
— de sodium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— — fondu			NS22S/NS21S	
E				
Eau pure			Toutes nuances	
— avec impur. chlorurées (1) .		60 à 100°	NSM21S/NSM22S	
— de mer + ...		20°	NSM21S/NSMC	
— de mer (2)		60 à 100°	UC76C	NSCD/NSM22S
Eau de Javel (voir hypochlorites).				
Eau lourde			NS22S	
Eau oxygénée exempte d'acidité.			NSM21S/NSMC	NS22S
Eau de Seltz			Toutes nuances	
Encres			NSM21S/NSMC	
Essence		t.t.	Toutes nuances	
Ether			Toutes nuances	
— de pétrole			Toutes nuances	
F				
Ferricyanure de potassium.....	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Ferrocyanure de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Fluor sec		200°	NS21A/NS21S	
Fluorure d'aluminium.....	10 %	20°	UC76C	NSCD
Fluorure de sodium.....	5 %	20°	UC76C	NSCD
Formol.....	t.c.	20 à 100°	NSM21S/NSMC	NS22S
Fromages.....		cuisson	NSM21S/NSMC	
G				
Glycérine.....		éb.	Toutes nuances	
Goudrons		t.t.	Toutes nuances	

(1) *En plus du risque de piqûre, il existe un risque de corrosion sous tension (notamment pour les pH légèrement acides) au-dessus de 70 °C.*

(2) *Le risque de corrosion est modéré par l'agitation, l'alternance des périodes d'immersion et d'émersion, le fini des surfaces.*

MILIEU D'UTILISATION	Concentration	Température	NUANCES CONSEILLÉES A	B
H				
Huile de lin avec 3 % H_2SO_4 ...		200°	NSM21S/NSMC	
Huiles brutes sans H_2SO_4		200°	Toutes nuances	
— avec H_2SO_4		200°	NSM21S/NSMC	
Huiles minérales.....		50°	Toutes nuances	
Huiles végétales		éb.	NSM21S/NSMC	NS22S
Hydrogène sulfuré sec.....		200°	Toutes nuances	
Hypochlorite de calcium, de sodium et de potassium + Cl actif	4 g/l	40°	NSM21S/NSMC (1)	NS22S +
Hyposulfite de sodium	25 %	éb.	Toutes nuances	
I				
Iode sec		20°	Toutes nuances	
Iode solution aqueuse	1 %	20°	NSM21S/NSMC	NS21A +
Iodure de potassium	sat.	éb.	NSM21S/NSMC	
J				
Jus de fruits			NSM21S/NSMC	NS21A
L				
Lait.....		t.t.	NS21A	
— fermenté		éb.	NSM21S/NSMC	
Légumes : utilisations domestiques		t.t.	Toutes nuances	
Légumes : conserverie.....		cuisson	NSM21S/NSMC	NS21A
M				
Mélasses			NS21A	
Mercure.....		20°	Toutes nuances	
Méthanol.....	t.c.	20° à éb.	NS21A/NS21S	
Moutarde			NSM21S/NSMC	
N				
Naphtaline			Toutes nuances	
Nitrate d'ammonium.....	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
— — fondu....	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	
— d'argent	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17

(1) *Les nuances à très bas carbone (NSM21S) sont préférées aux nuances stabilisées (NSMC) en raison de leur meilleure aptitude au polissage.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Nitrate d'argent fondu			NS21C	
— de calcium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
— de cuivre	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
— de fer (ferrique)	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
— de potassium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
— de sodium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	F17
Nitrite d'ammonium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	
— de sodium	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	
O				
Oxalate d'ammonium	t.c.	t.t.	F17	
— de potassium	t.c.	t.t.	F17	
— de sodium	t.c.	t.t.	F17	
P				
Paraffine fondue			Toutes nuances	
Perborate de sodium	t.c.	20°	Toutes nuances	
Perchlorate d'ammonium	10 %	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
— de sodium	sat.	éb.	UC87B	NSCD
Perchloréthylène et vapeurs		t.t.	NSM21S/NSMC	
Permanganate de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Peroxyde de sodium	10 %	100°	Toutes nuances	
Persulfate de potassium	t.c.	20°	NSM21S/NSMC	
Phénol		20°	NS22S/NS21S	
—		éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S +
Phosphate d'ammonium pur	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de potassium pur	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de sodium pur	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Potasse (1)	50 %	20°	Toutes nuances	
—	50 %	éb.	NSM21S/NSMC	
S				
Savons - matériel de cuisson		cuisson	NSM21S/NSMC	NS21A/NS21S
Silicate de sodium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Sodium fondu		780°	NSM21S/NSMC	

(1) *Les solutions concentrées et chaudes peuvent entraîner des fissures par corrosion sous tension. Nous consulter.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
Soude (1)	50 %	50°	NS22S/NS21S	
—	70 %	60°	NSM21S/NSMC	
—	50 %	110°	NSM21S/NSMC	
Soufre fondu		< 445°	NS22S/NS21S	
Sucres (solutions - sirops)	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Sulfate d'aluminium	t.c.	20°	NS22S/NS21S	
— —	10 %	éb.	NSM21S/NSMC	
— —	t.c.	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
— d'aluminium et de potassium (alun)	t.c.	20°	NS22S/NS21S	
— d'aluminium et de potassium (alun)	sat.	éb.	NSCD	NSM21S/NSMC
— d'ammonium	t.c.	éb.	NSM21S/NSMC	
Sulfate de calcium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de cuivre	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de fer (ferreux et ferrique)	t.c.	20°	Toutes nuances	
— de fer ferreux	t.c.	éb.	NSM21S/NSMC	NS22S/NS21S
— de manganèse	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de nickel	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de nickel + chlorure d'ammonium + acide borique (bain de nickelage)				
$\frac{NiSO_4}{250\ g/l} + \frac{AmCl}{20\ g/l} + \frac{H_2BO_3}{10\ g/l}$		60°	NSM21S/NSMC	
300 g/l 30 g/l 30 g/l		60°	NSM21S/NSMC	
Sulfate de potassium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
— de quinine	t.c.	20°	NS22S/NS21S	
— de sodium	t.c.	t.t.	Toutes nuances	
Sulfate de zinc	t.c.	t.t.	NS22S/NS21S	
Sulfite d'ammonium	sat.	éb.	NS22S/NS21S	
— de sodium	50 %	éb.	NS22S/NS21S	
Sulfure de carbone pur		éb.	Toutes nuances	
— de sodium	sat.	20°	Toutes nuances	
— —	50 %	90°	NS22S/NS21S	
— —	sat.	100°	NSCD	NSM21S/NSMC

(1) *Les solutions concentrées et chaudes peuvent entraîner des fissures par corrosion sous tension. Nous consulter.*

MILIEU D'UTILISATION			NUANCES CONSEILLÉES	
	Concentration	Température	A	B
T				
Térébenthine (essence de)			Toutes nuances	
Tétrachlorure de carbone sec...		20° à éb.	Toutes nuances	
Trichloréthylène et vapeurs		t.t.	NSM21S/NSMC	
U				
Urée (fabrication)		150°	NSM21S	
V				
Vapeur d'eau (1)		100°	NSM22S	
Viandes (2)		20°	Toutes nuances	
Vinaigres (3)		20°	NSM21S/NSMC	NS22S
— + chlorure de sodium.		20°	NSM21S/NSMC	
Vins blancs (3)		20°	NSM21S/NSMC	NS22S
— rouges		20°	NS21A/NS21S	

(1) *En présence d'impuretés chlorurées même en faibles teneurs, il existe un risque de fissuration par corrosion sous tension des nuances moins alliées que NSM22S.*

(2) *La résistance à la corrosion est fonction de la fréquence des nettoyages notamment en présence de sang. Au contact des viandes salées, les nuances contenant du molybdène (NSM21S/NSMC) sont préférables.*

(3) *En présence de vins blancs et de vinaigres les nuances au molybdène (NSM21S/NSMC) évitent l'altération du goût et de la couleur (casse ferrique).*

A 2

CORRESPONDANCE DES NUANCES UGINE AVEC LA NORMALISATION AMÉRICAINE AISI

Normalisation AISI	Nuances UGINE correspondantes (x : nuance approchée)	Observations sur les nuances UGINE
301	NS20 NS20E	Cr peut atteindre 19 %
302	NS20P NS21P	
302 B	NSZ x	C peut être > 0,15 % - Si peut être < 2 % Ni est > 10 % et Cr > 19 %
303	NSU	
304	NS21A ..... x NS21AS	Cr peut être < 18 %
304 L	NS22S x	Cr peut être < 18 %
305	NSV	
309	NS24	
309 S	NS24 ..... x NS24A	C > 0,08 %
310	NS30	
310 S	NS31 NS31S	
316	NSM21	
316 Ti	NSMC x	C peut être > 0,08 % - Ti ⩾ 4 C
316 L	NSM21S NSM22S	
317	NSM23	
317 L	NSM23 x	C peut atteindre 0,03 % - Si peut atteindre 0,60 % Mn peut atteindre 2 % - Ni peut atteindre 14,5 %
321	NS21C NS 21S x	C peut être > 0,08 % - Ti ⩾ 4 C
347	NS95	
348	NS95 x	Sans limitation en tantale
403	FI x	Cr peut être ⩾ 13 %
405	FIB FIA..... x	Sans aluminium
410	FI	
416	F12S	
420	U12 P12	
430	F17	
430 F	F17S	
446	DY1	

A 3

CORRESPONDANCE DES NUANCES UGINE AVEC LE CODE WERKSTOFF ET AVEC LA NORMALISATION PROVISOIRE ALLEMANDE VORNORM

N° Werkstoff	Vornorm	Nuances UGINE correspondantes (x : nuance approchée)	Observations sur les nuances UGINE
4 000	X 7 Cr 13	FIA x	Cr peut être < 12 %
4 001	X 7 Cr 14	FI x	C > 0,08 % - Cr peut être < 13 % (barres)
4 002	X 7 Cr Al 13	FIB x	
4 016	X 8 Cr 17	F 17	
4 104	X 12 Cr Mo S 17	F17S x	C peut être ⩽ 0,10 % S peut être ⩾ 0,25 %
4 300	X 12 Cr Ni 18-8	NS20P NS21P	
4 301	X 5 Cr Ni 18-9	NS21A NS21AS x	C peut être ⩾ 0,07 %
4 305	X 12 Cr Ni S 18-8	NSU x	S est > 0,20 %
4 306	X 2 Cr Ni 18-9	NS22S x	Ni peut être < 10 %
4 310		NS20 NS20E x	Cr peut être ⩾ 18 %
4 401	X 5 Cr Ni Mo 18-10	NSM21 x	C peut être ⩾ 0,07 % Ni peut être ⩽ 10,5 % Cr peut être < 16,5 %
4 404	X 2 Cr Ni Mo 18-10	NSM21S x	Ni peut être ⩽ 11 % Cr peut être < 16,5 %
4 435	X 2 Cr Ni Mo 18-12	NSM22S x	Ni peut être ⩽ 12,5 % Cr peut être < 16,5 %
4 436	X 5 Cr Ni Mo 18-12	NSM22S x	C plus faible Cr peut être < 16,5 % Ni peut être ⩽ 12 %
4 438		NSM23 x	C plus faible - Cr peut être ⩾ 19 % - Ni est ⩽ 15 %
4 541	X 10 Cr Ni Ti 18-9	NS21S ..... x NS21C	C peut être > 0,10 % - Ti > 4C
4 550	X 10 Cr Ni Nb 18-9	NS95 x	Ni peut être ⩾ 11 %
4 571	X 10 Cr Ni Mo Ti 18-10	NSMC x	Cr peut être < 16,5 % Ti > 4C
4 828		NSZ x	Ni peut être < 11 % Si peut être < 1,8 %
4 845		NS30 NS31	
4 864		QA2 x	Si > 2 % - Cr > 17 % Ni > 37 %
		QA1 x	Si peut être ⩽ 1,5 % Cr ⩽ 15 %
4 878		NS21C x	

A 4

CORRESPONDANCES DES NORMES FRANÇAISES, ALLEMANDES, AMÉRICAINES ET BRITANNIQUES

(Aciers inoxydables)

FRANCE (NF A 35-572) (1)	ALLEMAGNE (DIN 17.440) (2)	ÉTATS-UNIS (AISI)	GRANDE-BRETAGNE (BS 6290)
	ACIERS FERRITIQUES et MARTENSITIQUES		
Z 6 C 13	X 7 Cr 13	403	403 S 17
Z 6 CA 13	X 7 Cr-Al 13	405	405 S 17
Z 12 C 13	X 10 Cr 13	410	410 S 21
Z 12 CF 13	—	416	416 S 21
Z 20 C 13	X 20 Cr 13	420	420 S 29
Z 30 C 13	—	—	420 S 45
Z 40 C 14	X 40 Cr 13	—	—
Z 8 C 17	X 8 Cr 17	430	430 S 15
Z 8 CD 17.01	X 6 Cr-Mo 17	—	432 S 19
Z 10 CF 17	X 12 Cr-Mo-S 17	430 F	—
Z 100 CD 17	—	440 C	—
Z 6 CNU 17.04	—	—	—
Z 6 CNUD 15.04	—	—	—
	ACIERS AUSTÉNITIQUES		
Z 2 CN 18.10	X 2 Cr-Ni 18.09	304 L	304 S 12
Z 6 CN 18.09	X 5 Cr-Ni 18.09	304	304 S 15
Z 8 CN 18.12	—	305	305 S 19
Z 10 CN 18.09	X 12 Cr-Ni 18.08	302	302 S 25
Z 12 CN 17.08	—	301	301 S 01
Z 6 CNT 18.11	X 10 Cr-Ni-Ti 18.09	321	321 S 12
Z 6 CNNb 18.11	X 18 Cr-Ni-Nb 18.09	347	347 S 17
Z 10 CNT 18.11	—	—	321 S 20
Z 8 CN 13.13	—	—	—
Z 10 CNF 18.09	X 12 Cr - Ni - S 18.08	303	303 S 21
Z 2 CND 17.12	X 2 Cr-Ni-Mo 18.10	316 L	316 S 12
Z 6 CND 17.11	X 5 Cr-Ni-Mo 18.10	316	316 S 16
Z 8 CNDT 17.12	X 10 Cr-Ni-Mo-Ti 18.10	—	320 S 17
Z 6 CNDNb 17.12	X 10 Cr-Ni-Mo-Nb 18.10	—	318 S 17
Z 2 CND 17.13	X 2 Cr-Ni-Mo 18.12	316 L	316 S 12
Z 6 CND 17.12	X 5 Cr-Ni-Mo 18.12	316	316 S 16
Z 8 CNDT 17.13	—	—	320 S 17
Z 6 CNDNb 17.13	X 10 Cr-Ni-Mo-Nb 18.12	—	318 S 17
Z 2 CND 19.15	—	317	317 S 16
Z 5 CNDU 21.08	—	—	—

(1) *Les nouvelles normes françaises concernant les nuances d'aciers inoxydables d'usage courant, éditées par l'AFNOR : 23, rue Notre-Dame-des-Victoires-75-PARIS (2e) avec les analyses correspondantes, sont les suivantes :*

— *fascicule NFA 35-572 : Prescriptions communes (en vigueur depuis novembre 1968) ;*

— *fascicule NFA 35-573 : Tôles, larges bandes, feuillards et larges-plats (en vigueur depuis février 1969) ;*

— *fascicule NFA 35-574 : Demi-produits et barres (en vigueur depuis février 1969).*

(2) *Norme allemande remplaçant la codification WERKSTOFF.*

B 1

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES MÉTAUX ET ÉLÉMENTS USUELS

Métaux	Densité g/cm³	Point de fusion à 760 mm Hg °C	Coefficient de dilatation linéaire de 0° à 100 °C	Conductibilité thermique à 20 °C Gde cal. m/m² h. °C (1)
Acier	7,85	1.450-1.530	12×10^{-6}	22,45
Aluminium	2,70	658	23,7	180
Antimoine	6,69	631	10,8	14
Argent	10,5	961	19,7	364
Arsenic	5,72	817	6	
Bismuth	9,70	271	13	7
Bore	2,30	2.300	8,3	
Bronze	7,4-8,9	900	18	50-55
Cadmium	8,64	321		79,2
Carbone graphite	2,25		1,3	20,5
Chrome	6,92	1.890	6,2	57,5
Cobalt	8,80	1.490	12,6	59,4
Cuivre	8,93	1.083	16,2	338
Étain	7,29	232	23	54
Fer	7,86	1.527	12,3	40-50
Fonte	7,25	650	10	40
Iode	4,9	113	93	0,37
Laiton	8,4-8,7	1.064	19	50-100
Magnésium	1,74	651	26,1	137
Manganèse	7,21	1.265	23	
Mercure	13,59	38,8	23	6,5
Molybdène	10,20	2.570	5,2	126
Nickel	8,90	1.452	13,1	50
Or	19,3	1.063	14,4	256
Palladium	11,5	1.553	11,9	60
Phosphore	1,85	44,1	125	
Platine	21,4	1.775	9	61
Plomb	11,33	327	28,9	30
Silicium	2,3	1.425	6	72
Soufre	1,96	119	64	0,22
Tantale	16,6	2.996	6,5	46,8
Titane	4,5	1.800	8,5	0,045
Tungstène	19	3.370	4,3	173
Uranium	18,3	1.130		23
Vanadium	5,6	1.710	7,8	
Zinc	7,1	419	30	97
Zirconium	6,4	1.857	5	

(1) L'unité Gde cal. m/m². h. °C = 360 fois l'unité cal. cm/cm². s. °C.

B 2

ANALYSES DES PRINCIPALES NUANCES D'ACIERS AU CARBONE

Teneurs sur coulée			C % maxi.	P % maxi.	S % maxi.	Mn %	Si %	N_2 % maxi.
Acier au carbone (0,10 % C) qualité CC10			0,05-0,10	0,04	0,04	0,30-0,60	< 0,30	
Acier au carbone (0,75 % C) qualité XC70f			0,68-0,77	0,035	0,035	0,50-0,80	0,10-0,40	
qualité XC80f			0,75-0,85	0,035	0,035	0,50-0,80	0,10-0,40	
Aciers au carbone pour charpentes								
Nuances	Qualités	Mode de désoxydation						
A 33	2	—		0,050	0,050			
A 34	1	—		0,060	0,050			
	2	—		0,050	0,050			0,007
E 24 (ex. A 37)	1	—	0,20 (1)	0,060	0,050			
	2	—	0,20 (1)	0,050	0,050			0,007
	3	NE	0,16	0,045	0,045			
	4	NE (Calmage spécial)	0,16	0,040	0,040			
E 26 (ex. A 42)	1	—	0,22 (1)	0,060	0,050			
	2	—	0,22 (1)	0,050	0,050			0,007
	3	NE	0,18	0,045	0,045			
	4	NE (Calmage spécial)	0,18	0,040	0,040			
E 30 (ex. A 47) (*)	2	NE	0,24	0,050	0,050			
	3	NE	0,20 (2)	0,045	0,045			
	4	NE (Calmage spécial)	0,20 (2)	0,040	0,040			
E 36 (ex. A 52) (**)	2	NE	0,24	0,050	0,050			
	3	NE	0,20 (2)	0,045	0,045			
	4 A	NE	0,20 (2)	0,040	0,040			
	4 B	(Calmage spécial)	0,18	0,040	0,040		+Nb+V+Ti<0,20	

NE : *non effervescent*

(*) E 30 (A 47) *Les teneurs en manganèse et en silicium ne doivent pas dépasser respectivement 1,30 et 0,40 % sur coulée et 1,40 et 0,45 % sur produit.*

(**) E 36 (A 52) *Les teneurs en manganèse et en silicium ne doivent pas dépasser respectivement 1,50 et 0,55 % sur coulée et 1,60 et 0,60 % sur produit.*

(1) *Pour les profilés les teneurs en carbone sont fixées à :*

E 24-1 = 0,18
E 24-2 = 0,18
E 26-1 = 0,20
E 26-2 = 0,20

(2) *Pour les produits d'épaisseur supérieure à 16 mm, il est admis une teneur maximale en carbone de 0,22 % sur coulée et 0,24 % sur produit.*

B 3

ANALYSES DES PRINCIPALES NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES

Nuances UGINE	C moyen ou maxi	Cr	Ni	Mo	Ti	Autres éléments
Aciers inoxydables au chrome						
FI	0,10	13				
FIA	0,03	12				
FIB	0,05	12,5				
U 12	0,20	13				
P 12	0,30	13				
F 17	0,07	17				
F 12 S	0,07	13				S : 0,25
F 17 S	0,10	17				S : 0,20
F 200	0,07	17		1,3		
Aciers inoxydables nickel-chrome à moyen carbone						
NS 20	0,08	17	7,5			
NS 20 E	0,10	18	7,5			
NS 20 P	$\leqslant$ 0,09	18	8,5			
NS 21 P	0,10	18	8,5			
NS 21 S	0,10	18	10,5		$\geqslant$ 4 C	
NSU	0,06	18	8,5			S : 0,25
Aciers inoxydables nickel-chrome à bas carbone						
NS 21 A	$\leqslant$ 0,07	18	9			Analyse nuance tôles
NS 21 AS	$\leqslant$ 0,07	18,5	9,5			Analyse nuance tôles
NS 21 C	$\leqslant$ 0,08	18	10,5		$\geqslant$ 5 C	
Acier inoxydable nickel-chrome à très bas carbone						
NS 22 S	$\leqslant$ 0,03	18	9			
Aciers inoxydables nickel-chrome molybdène						
NSM 21	$\leqslant$ 0,07	17	11,5	$\geqslant$ 2		Analyse nuance tôles
NSM 21 S	$\leqslant$ 0,03	17	11	$\geqslant$ 2		
NSM 22 S	$\leqslant$ 0,03	17,5	12	$\geqslant$ 2,5		
NSMC	0,08	17	11,5	$\geqslant$ 2	$\geqslant$ 4 C	
NSCD	0,03	17,5	16	$\geqslant$ 5		Cu : 3
Aciers inoxydables nickel-chrome résistant au fluage (f) ou à la corrosion à chaud (c)						
(f) NS 95	0,06	18	12			Nb $\geqslant$ 10 C
(f) NS 190	0,10	17	13,5		$\geqslant$ 5 C	W : 3,5
(f) FLUGINOX 130	0,05	15	25	1,2	1,8	+ V + Al
(f) FLUGIVAC 131	0,05	15	25	1,2	2,1	+ V + Al
(c) NSZ	0,15	20	11			Si : 2
(c) NS 24	0,15	23	13,5			Si $\leqslant$ 1
(c) NS 30	0,10	25	20			Si $\leqslant$ 1
(c) QA 2	0,12	18	38			Si : 2
(f-c) FLUGINOX 150	0,12	20	20	3		Co : 20 W : 2,5 Nb : 1
(f-c) QA 18	0,10	20	solde		0,4	
(f-c) QA 7	0,05	16	solde			Fe : 7
(f-c) FLUGINOX N 25	0,06	21,5	solde	9		Fe : 18 Co : 1,5 W : 0,6
(f-c) FLUGINOX C 35	0,10	20	10			W : 15 Si : 0,6 Co : solde

Les aciers inoxydables contiennent, sauf addition volontaire, les éléments d'accompagnement habituels, en particulier des teneurs en silicium < 1% et des teneurs en manganèse généralement < 1% pour les aciers martensitiques et ferritiques et < 2% pour les aciers austénitiques.

Ils contiennent aussi en général de faibles quantités de soufre et de phosphore dans les limites des normes internationales.

B 4

ANALYSES DES PRINCIPAUX ALLIAGES DE TITANE, D'ALUMINIUM, DE CUIVRE ET DE ZINC

	Fe %	C %	H_2 %	O_2 %	Al %	Sn %	Mo %	Va %	Pd %	Zr %	W %	Ti
Titane et alliages												
Titane à 99 % :												
UT35	⩽ 0,20	⩽ 0,08	⩽ 0,0125	⩽ 0,20								solde
UT40	⩽ 0,25	⩽ 0,08	⩽ 0,0125	⩽ 0,25								solde
UT50	⩽ 0,25	⩽ 0,08	⩽ 0,0125	⩽ 0,35								solde
UT60	⩽ 0,35	⩽ 0,10	⩽ 0,0125	⩽ 0,40								solde
UT35P	⩽ 0,20	⩽ 0,08	⩽ 0,0150	⩽ 0,20					0,20			solde
UTA6V	⩽ 0,25	⩽ 0,08	⩽ 0,0150	⩽ 0,20	5,5-7			3,5 à 4,5				solde
UTA6V6Sn2	0,35-1,00	⩽ 0,05	⩽ 0,0150	⩽ 0,20	5-6	1,5-2,5		5 à 6				solde
UTA5E	⩽ 0,50	⩽ 0,15	⩽ 0,0200	⩽ 0,20	4-6	2-3						solde
UTA8DV.....	⩽ 0,30	⩽ 0,08	⩽ 0,0150	⩽ 0,12	7,3-8,5		0,75 à 1,25	0,75 à 1,25				solde
UT684	⩽ 0,20	⩽ 0,10	⩽ 0,0125	⩽ 0,150	6					5	1	solde

B 4 (suite)

	Fe %	Si %	Cu %	Mg %	Mn %	Al %	Zn %	Sn %	Pb %	Ni %	Observations
Aluminium et alliages											
Aluminium à 99,99 %											+ impuretés
Aluminium A5 (99,5 %)											+ impuretés
AG 3	⩽ 0,4	⩽ 0,3	⩽ 0,1	2,5-3,7	0,2-0,5	le reste					
AG 5	⩽ 0,4	⩽ 0,3	⩽ 0,1	4,5-5,7	0,2-0,5	le reste					
Duralumin (A-U4-G)	⩽ 0,5	0,1-0,7	3,7-4,7	0,4-0,8	0,3-0,9	le reste					
A-U4-G1	⩽ 0,5	0,2-0,9	3,5-4,5	0,9-1,7	0,8-1,5	le reste					
Cuivre et alliages											
Cuivre pur O.F.H.C. (norme française qualité U9d)			99,95								Exempt de O_2 double pliage à bloc après chauffage en atmosphère d'H_2
Cuivre électrolytique											
Laiton courant U-Z-36			64 (1)				36 (2)				Total mini. des constituants 99,5 % impuretés 0,5 %
Laiton d'emboutissage U-Z33			67 (3)				33 (3)				Total mini. des constituants 99,5 % impuretés 0,5 %
Laiton marine	< 0,005		70				29	1	< 0,05		Autres impuretés 0,1 %
Bronze courant U-E5-Z4			91 (4)				4 (4)	5 (4)			
Bronze phosphoreux 95-5 (U-E5)			⩾ 83					⩾ 4,5			Total maxi. des impuretés 12,5 %
Cupro-nickel 70-30			70 (5)							30 (5)	Nombreuses impuretés
Maillechort U-Z22-N15			63 (6)				22			15 (4)	Total mini. des constituants 98,7 % impuretés 1,3 %
Zinc et alliages											
Zinc fin (99,5-99,99 %)											
Zinc ordinaire (98,5-99,0 %)											
Zamak 2	0,075	—	3	0,03 (7)		4	le reste (*)	0,001	0,003		
Zamak 3	0,075	—	0,03	0,03 (7)		4	le reste (*)	0,001	0,003		
Zamak 5	0,075	—	1	0,03 (7)		4	le reste (*)	0,001	0,003		

** En ce qui concerne les Zamaks, les impuretés contenues dans le zinc de l'alliage sont : Fe 0,1 % - Pb 0,005 % - Cd 0,005 % - Sn 0,002 %. De toute façon, le total des 3 impuretés : Pb, Sn et Cd ne doit pas dépasser 0,008 %.*

Tolérances: (1) + 2 - 1 ; (2) + 1 - 2 ; (3) + 1,5 - 1,5 ; (4) + 2 - 2 ; (5) + 1 - 1 ; (6) + 3 - 3 ; (7) 0,06 maxi

B 5

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES A LA TEMPÉRATURE AMBIANTE (20 °C) DES ACIERS AU CARBONE, DES ACIERS INOXYDABLES, DU TITANE ET DE SES ALLIAGES ET DES ALLIAGES D'ALUMINIUM, DE CUIVRE ET DE ZINC

Métaux ou alliages	Poids spécifique g/cm³	Coefficient moyen de dilatation linéaire entre 20° et 100 °C x 10⁻⁶/°C	Chaleur spécifique à 20 °C cal/g/°C	Résistivité électrique à 20 °C microohm.cm	Point de fusion °C	Conductibilité thermique à 20 °C cal.cm/cm².s.°C
Aciers						
Acier au carbone à 0,10 % C.....	7,87	13,9	0,11	11,1	1 490	0,140
Acier au carbone à 0,75 % C.....	7,85	13,6	0,11	15,5	1 460	0,090
Acier inoxydable à 17 % Cr	7,7	11,0	0,12	60	1 490	0,060
Acier inoxydable Cr-Ni 18-10	7,9	17,3	0,12	70	1 450	0,035
Acier inoxydable Cr-Ni-Mo	7,9	16,0	0,12	73	1 400	0,037
Titane et ses alliages						
Titane à 99 % (UT35-UT40-UT50-UT60) .	4,507	8,5	0,13	50	1 670	0,045
UT35P	4,5	8,5	0,13	50	1 660	0,045
UTA6V.....	4,4	8,8	0,13	171	1 650	0,016
UTA6V6Sn2	4,55	9	0,154	154	1 700	0,017
UTA5E.....	4,66	9,35	0,126	157	1 590	0,018
UTA8DV.....	4,37	8,4	0,13	198	1 590	0,014
UT684.....	4,48	11,0	—	167	1 600	—

B 5 (suite)

Métaux ou alliages	Poids spécifique g/cm³	Coefficient moyen de dilatation linéaire entre 20° et 100°C x 10⁻⁶/°C	Chaleur spécifique à 20 °C cal/g/°C	Résistivité électrique à 20 °C microohm.cm	Point de fusion °C	Conductibilité thermique à 20 °C cal.cm/cm².s.°C
Aluminium et alliages						
Aluminium (99,99 %)	2,70	23,8	0,23	2,6	660	0,49
Aluminium A5 (99,5 %)	2,70	23,8	0,23	2,7	658	0,50
AG3	2,67	24,0	0,23	6,3	600-630	0,32
AG5	2,65	24,0	0,23	7,8	560-630	0,30
Duralumin	2,80	24,0	0,22	4,5	550-600	0,37
A-U4-G1	2,80	24,0	0,22	4,65	550-600	0,34
Cuivre et alliages						
Cuivre pur O.F.H.C	8,96	16,5	0,09	1,72 (2)	1 083	0,94
Cuivre électrolytique	8,92 (1)	16,5	0,09	1,72 (2)	1065-1083	0,93
Laiton courant U-Z-36	8,60	20,3	0,09	6,2	905-930	0,13
Laiton d'emboutissage U-Z-33	8,50	20,0	0,09	6,7	905-930	0,15
Laiton marine	8,53	20,2	0,09	6,9	935	0,24
Bronze courant U-E5-Z4	8,80	22,0	0,09	14,0	1 060	0,20
Bronze phosphoreux 95-5	8,86	17,0	0,09	9,6	1 050	0,21
Cupronickel 70-30	8,90	15,7	0,09	39,0	1180-1220	0,07
Maillechort U-Z22-N15	8,70	18,4	0,09	29,0	1 055	0,03
Zinc et alliages						
Zinc	7,15	29,3 (3)	0,095	5,75	418	0,20
Zamak 2	6,6	27,0	0,10	15,7	380	0,27
Zamak 3	6,7	27,0	0,10	15,3	380	0,27
Zamak 5	6,8	27,0	0,10	14,8	380	0,27

(1) *Variable entre 8,89 et 8,94.*

(2) *Valeur de l'état recuit. A l'état écroui, on a 1,76 μω.cm²/cm.*

(3) *Valeur moyenne. On trouve, dans les divers manuels qui traitent de la question, des valeurs assez différentes. Ceci s'explique par l'importante anisotropie du zinc pur. Les coefficients de dilatation linéaire, mesurés sur un cristal unique sont :*
64,3 × 10⁻⁶ suivant l'axe principal du cristal,
12,5 × 10⁻⁶ perpendiculairement à cet axe.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES A 20 °C DES ACIERS AU CARBONE, DES ACIERS INOXYDABLES, DU TITANE ET DE SES ALLIAGES ET DES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM, DE CUIVRE ET DE ZINC

Métaux ou alliages	Résistance à la rupture kgf/mm²	Limite d'élasticité vraie ou limite conventionnelle à 0,2 % minimale kgf/mm²		Allongement de rupture (valeurs minimales) %		Module d'élasticité (taux de travail sur allongement unitaire) kgf/mm²
		e ⩽ 30	30 < e ⩽ 50	e ⩽ 30	30 < e ⩽ 50	
ACIERS AU CARBONE						
Aciers pour tôles et larges plats :						
A-33 - 2 qualités	30-50	18	18	18	17	22.400
A-34 - 2 qualités	34-42	17	16	26-28	25-27	22.400
E-24 (ex. A-37) - 4 qualités	37-45	24	22	24-28	23-27	22.400
E-26 (ex. A-42) - 4 qualités	42-50	26	24	21-27	20-25	22.400
E-30 (ex. A-47) - 3 qualités	47-57	28-30	26-28	21-23	20-22	22.400
E-36 (ex. A-52) - 3 qualités	52-62	36	34	20-22	19-21	22.400
A-50 - 2 qualités	50-60	30	26-28	19	18	22.400
A-60 - 2 qualités	60-72	34	32	15	14	22.400
A-70 - 1 qualité	70-85	37	35	10	9	22.400
Aciers pour laminés marchands et poutrelles:						
A-33 - 1 qualité	33-50	18	—	18	—	22.400
A-34 - 2 qualités	34-42	19	18	28-30	27-29	22.400
E-24 (ex. A-37) - 4 qualités	37-45	24	22	26-29	25-28	22.400
E-26 (ex. A-42) - 4 qualités	42-50	26	24	23-28	22-27	22.400
E-30 (ex. A-47) - 3 qualités	47-57	28-30	26-28	23-24	22-23	22.400
E-36 (ex. A-52) - 3 qualités	52-62	36	34	22-23	21-22	22.400
A-50 - 2 qualités	50-60	30	28	21	20	22.400
A-60 - 2 qualités	60-72	34	32	16	15	22.400
A-70 - 1 qualité	70-85	37	35	11	10	22.400
ACIERS INOXYDABLES						
Acier ferritique à 17 % Cr sur barres adoucies	45-60	30		18		21.000
Acier ferritique à 17 % Cr sur tôles	47-62	30		25		21.000
Acier austénitique 18-10 moyen carbone :						
sur barres adoucies	55-70	21		45		19.000*
sur tôles laminées à froid glacées	55-70	24		50		19.000
sur tôles laminées à chaud						
Acier austénitique 18-10 bas carbone :						
sur barres adoucies	52-67	19		50		19.000
sur tôles laminées à froid glacées	55-70	23		50		19.000
sur tôles laminées à chaud						
Acier austénitique 18-10 très bas carbone :						
sur barres adoucies	50-65	17		50		19.000
sur tôles laminées à froid glacées	50-65	22		50		19.000
sur tôles laminées à chaud						
Acier austénitique 18-12 Mo stabilisé Ti :						
sur barres adoucies	52-67	20		45		19.000
sur tôles laminées à froid glacées	55-70	25		45		19.000
sur tôles laminées à chaud						
TITANE ET SES ALLIAGES						
		(1)		A %-5a mini. (a)	A %-5,65 $\sqrt{s_0}$ mini. (b)	
Titane à 99 %						
UT 35 recuit	29-41	20		22	30	10.950
UT 40 recuit	40-55	28		20	22	10.950
UT 50 recuit	50-65	34		18	20	10.950
UT 60 recuit	55-74	45		15	16	10.950
UT 35 P recuit	29-42	⩾ 20		22	30	10.950
UTA6 V recuit	89-115	83		10	8 c ⩾ 0,4 6 e < 0,4	11.600
UTA6V6Sn2 recuit	102-127	92		8	—	11.800
UTA5E recuit	80-102	77		10	10	11.400
UTA8DV traité	92-115	84		9	—	12.750
UT 684 traité	100-117	92		6	6	12.500
		(1) $E_{0,2}$ mini.		(a) éprouvettes cylindr. (b) éprouvettes type tôles		

* *Valeurs non garanties.*

B 6 (suite)

Métaux ou alliages	Résistance à la rupture kgf/mm²	Limite d'élasticité kgf/mm²	Allongement de rupture (valeurs minimales) %	Module d'élasticité (taux de travail sur allongement unitaire) kgf/mm²
ALUMINIUM et ALLIAGES				
Aluminium à 99,99 % recuit	5,5-6	2,5-3	45-60	6.650
Aluminium à 99,99 % 1/2 écroui .	9-10	4-6	11-18	6.650
Aluminium à 99,99 % écroui.....	12-15	10-12	7-10	6.650
Aluminium A5 (99,5 %) recuit ...	7-9	2-4	38-50	6.800
Aluminium A5 (99,5 %) écroui ..	15-19	14-16	4-7	6.900
Aluminium à 99,25 % recuit	8,5-9,5	1,8-4,0	28-33	6.650
Aluminium à 99,25 % écroui.....	15-20	13-17	3-6	6.650
Alliages Al-Mg :				
AG1 recuit	12-16	5-8	19-26	7.000
AG1 écroui	20-24	16-22	3-5	7.000
AG3 recuit	20-23	8-12	19-24	7.000
AG3 écroui	24-30	16-26	6-8	7.000
AG5 recuit	30-34	13-17	20-25	7.000
AG5 écroui	36-44	34-40	4-8	7.000
Alliages Al-Mg-Cu :				
Duralumin	40-45	24-30	13-18	7.500
A-U4-Gl	45-50	32-38	12-18	7.500
CUIVRE et ALLIAGES				
Cuivre pur O.F.H.C. recuit	20	7	30	12.000
Cuivre pur O.F.H.C. écroui 1/4 dur	23	21	18	12.000
Cuivre pur O.F.H.C. écroui 1/2 dur	25	25	10	12.000
Cuivre pur O.F.H.C. écroui 4/4 dur	32	31	5	12.000
Cuivre électrolytique recuit	20	7	30	12.000
Cuivre électrolytique écroui 1/4 dur	23	21	18	12.000
Cuivre électrolytique écroui 1/2 dur	25	25	10	12.000
Cuivre électrolytique écroui 4/4 dur	32	31	5	12.000
Laiton courant U-Z36 recuit.....	31	10,5	48	9.400
Laiton courant U-Z36 écroui	60	42	3	9.400
Laiton d'emboutissage U-Z33 recuit	30	10,5	53	9.400
Laiton d'emboutissage U-Z33 écroui	58	44	3	9.400
Laiton marine recuit.....	37	13-15	65	11.200
Bronze courant U-E5-Z4 recuit ..	36	17-19	52	10.800
Bronze courant U-E5-Z4 écroui ..	70	60-65	10	10.800
Bronze phosphoreux recuit	35	14	58	10.800
Bronze phosphoreux écroui.....	98	96	2	10.800
Cupronickel recuit	42	18	45	15.470
Maillechort U-Z22-N15 recuit ...	36	18	36	12.700
Maillechort U-Z22-N15 écroui ..	45	43	15	12.700
ZINC et ALLIAGES				
Zinc fin (99,5-99,99 %) :				
dans le sens du laminage ...	12		23	9.000
perpendiculairement au sens du laminage	14		14	9.000
Zinc ordinaire (98,5-99,0 %) :				
dans le sens du laminage ...	19		60	9.000
perpendiculairement au sens du laminage	28		52	9.000
Alliages Zn-Al-Mg-Cu :				
Zamak 2	36 (38)**		8 (5)**	
Zamak 3	29 (34)**		10 (16)**	
Zamak 5	33 (27)**		7 (15)**	

** *Les nombres entre parenthèses sont représentatifs de l'état du matériau après vieillissement de 7 ans à l'ambiante.*

B 7

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE QUELQUES MATÉRIAUX NON MÉTALLIQUES

	Densité	Dilatation linéaire	Chaleur spécifique	Résistivité	Fusion	Conductibilité thermique
	g/cm³	x 10^{-6}/°C	cal/g	microohm cm²/cm	°C	cal.cm/ cm².s.°C
MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION						
Ardoise	2,7		0,18			0,00081
Argile sèche	2,2		0,23 (3)			
Asphalte	1,1		0,22			
Béton de graviers	2,3 (1)		0,21			0,00167
Brique pleine	2,1	4,8	0,20			0,00300
Ciment (après prise)	2,9	14,0	0,18 (4)			0,00071
Granit	2,7	8,0	0,18 (5)			0,00406
Grès	2,3 (2)	8,3	0,19 (6)			0,00416
Marbre	2,7	11,7	0,22 (7)			0,00540
Pierre calcaire	2,6	10,9	0,20 (8)			0,00610
Pierre meulière	2,2		0,20 (9)			0,00400
Sable sec	1,5		0,19			0,00013
VERRES						
Verre dur	2,54	7,2	0,19	91×10^6 (10)	600	0,0024
Verre à glaces	2,46-2,52	8,7	0,19	91×10^6 (10)	600	0,0022
Verre à vitre	2,53	8,8	0,19	91×10^6 (10)	600	0,0024
Cristal ordinaire	3,33	7,96	0,17			

(1) Valeur moyenne. Certains ouvrages donnent des valeurs beaucoup plus faibles.
(2) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 2,1 et 2,5.
(3) Valeur moyenne. Suivant les types d'argile, les valeurs varient de 0,21 à 0,29.
(4) Pour le ciment Portland les valeurs réelles sont comprises entre 0,154 et 0,210.
(5) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 0,150 et 0,245.
(6) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 0,170 et 0,233.
(7) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 0,190 et 0,285.
(8) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 0,135 et 0,220.
(9) Valeur moyenne. Les valeurs réelles sont comprises entre 0,180 et 0,230.
(10) Valeur exprimée en mégohms cm²/cm.

B 8

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES VERRES

Type de verre	Résistance à la rupture	Limite élastique	Module d'élasticité
	kgf/mm²	kgf/mm²	kgf/mm²
Verre à glace	3,5	3,5	7.300
Verre à vitre	3,5	3,5	4.800 à 8.000

B 9

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES BOIS

Nature des essences et types de bois	Bois très légers	Bois résineux		Bois feuillus		
	Balsa	légers : Epicéa Sapin Spruce	mi-lourds : Pin Orégon	tendres : Peuplier Tilleul Bouleau	mi-durs : Chêne Hêtre Erable Acajou Teck Iroko	durs : Chêne dur Charme Fruitiers
Densité (g/cm³) à 15 % d'humidité	0,2	0,4-0,5	0,5-0,6	0,4-0,55	0,5-0,7	0,6-0,8
Coefficient transversal de conductibilité thermique* ..... (cal.cm/cm².s.°C)	0,0014	0,0025 à 0,0030	0,0025 à 0,0030	0,0025 à 0,0030	0,0033 à 0,0039	0,0033 à 0,0039
Coefficient de dilatation à l'humidité (% par % d'humidité)						
transversal*	0,1-0,2	0,15-0,30	0,15-0,30	0,15-0,30	0,20-0,35	0,20-0,35
axial*	0,005	0,010	0,010	0,010	0,015	0,015
Contraintes de rupture (kgf/mm²)						
Compression axiale*..		3-4	3,5-4,5	2,5-3,5	4-6	5-7
Compression transversale*		0,5-0,7	0,7-0,9	0,8-0,9	1,0-1,2	1,5-2,0
Traction axiale*		10-12	10-12	8-12	8-12	10-15
Traction transversale*.		0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,4-0,6
Cisaillement axial* ...		0,3-0,6	0,3-0,6	0,4-0,6	0,4-0,6	0,6-1,0
Module d'élasticité axial* (kgf/mm²) ...		800-1200	800-1200	800-1200	800-1200	1200-1500

* *Le sens axial est celui des fibres du bois.*

* *Le sens transversal lui est perpendiculaire.*

C 1

COMPARAISON DES ÉCHELLES DE DURETÉ (jusqu'à Brinell 430)

(à titre indicatif - d'après EURONORM 8-55)

Acier ordinaire brut ou recuit

Dureté Brinell		Dureté Rockwell		Dureté Wickers	Dureté Shore
Diamètre de l'empreinte en mm	Chiffre de dureté bille d'acier ⌀ 10 mm charge 3.000 kg	Échelle C cône en diamant 120° charge 150 kg	Échelle B bille d'acier ⌀ 1/16 de pouce charge 100 kg	diamant pyramide 136° charge 30 kg	
6,00	96		52,6	96	
5,80	103		58,6	103	
5,60	111		64,0	111	
5,50	116		67,1	116	
5,40	121		69,8	121	
5,30	126		72,4	126	
5,20	131		74,8	131	
5,10	137		77,2	137	
5,00	143		79,5	143	
4,90	149		81,8	149	
4,80	156		84,1	156	
4,70	163		86,2	163	
4,60	170		88,2	170	
4,55	174		89,3	174	
4,50	179		90,6	179	
4,45	183		91,4	183	
4,40	187		92,3	187	
4,35	192		93,3	192	
4,30	197		94,3	197	
4,25	201		95,2	201	
4,20	207		96,1	207	
4,15	212		97,0	212	
4,10	217		97,8	217	
4,05	223		98,7	223	
4,00	229		99,5	229	
3,95	235	20,2		239	34
3,90	241	21,3		241	35
3,85	248	22,6		248	36
3,80	255	23,8		255	—
3,75	262	24,9		262	37
3,70	269	26,0		269	38
3,65	277	27,2		277	39
3,60	285	28,3		285	40
3,55	293	29,4		293	41
3,50	302	30,5		302	42
3,45	311	31,6		311	44
3,40	321	32,8		321	45
3,35	331	33,9		331	46
3,30	341	35,0		341	48
3,25	352	36,2		352	49
3,20	363	37,4		364	51
3,15	375	38,7		378	52
3,10	388	40,2		394	54
3,05	401	41,6		411	56
3,00	415	43,2		430	58
2,95	429	44,6		449	59

C 2

COMPARAISON DES ÉCHELLES DE DURETÉ

(au-dessus de Brinell 400)

Acier ordinaire traité

Dureté Wickers diamant pyramide charge 30 kg	Dureté Rockwell Échelle C cône en diamant charge 150 kg	Dureté Shore
410	41,5	56
420	42,4	57
430	43,2	58
440	44,0	59
450	44,8	60
460	45,5	61
470	46,3	62
480	47,0	62
490	47,7	63
500	48,3	64
510	49,0	65
520	49,6	66
530	50,3	67
540	50,9	68
550	51,5	68
560	52,1	69
570	52,7	70
580	53,3	71
590	53,8	72
600	54,4	72
610	54,9	73
620	55,4	74
630	55,9	75
640	56,4	76
650	56,9	76
660	57,4	77
670	57,9	78
680	58,4	79
690	58,9	79
700	59,3	80
720	60,2	81
740	61,1	83
760	61,9	85
780	62,7	86
800	63,5	88
820	64,3	89
840	65,0	90
860	65,7	92
880	66,3	93
900	66,9	94
920	67,5	96
940	68,0	97

C 3

PLATS EN ACIER (POIDS SPÉCIFIQUE 7,85) - POIDS D'UN MÈTRE EN KG

(pour les épaisseurs ou les largeurs plus faibles ou plus fortes prendre sous-multiples ou multiples des chiffres indiqués)

Épaisseur en mm	Largeur en mm															
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
5	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96	2,16	2,36	2,56	2,76	2,95	3,15	3,34	3,54	3,74	3,93
6	1,18	1,42	1,65	1,89	2,12	2,36	2,60	2,83	3,07	3,31	3,54	3,78	4,01	4,25	4,49	4,72
7	1,37	1,65	1,93	2,20	2,48	2,75	3,03	3,30	3,58	3,86	4,13	4,41	4,68	4,96	5,23	5,51
8	1,57	1,89	2,20	2,52	2,83	3,15	3,46	3,78	4,10	4,41	4,72	5,04	5,35	5,67	5,98	6,30
9	1,77	2,12	2,48	2,83	3,19	3,54	3,90	4,25	4,60	4,96	5,31	5,67	6,02	6,37	6,73	7,08
10	1,96	2,36	2,75	3,15	3,54	3,93	4,33	4,72	5,12	5,51	5,90	6,30	6,69	7,08	7,48	7,85
11	2,16	2,60	3,03	3,46	3,90	4,33	4,76	5,19	5,63	6,06	6,49	6,93	7,36	7,79	8,22	8,66
12	2,36	2,83	3,30	3,78	4,25	4,72	5,19	5,67	6,14	6,61	7,08	7,55	8,03	8,50	8,97	9,44
13	2,55	3,07	3,58	4,09	4,60	5,12	5,63	6,14	6,65	7,16	7,67	8,18	8,70	9,21	9,72	10,23
14	2,75	3,30	3,86	4,41	4,96	5,51	6,06	6,61	7,16	7,71	8,26	8,81	9,36	9,92	10,46	11,02
15	2,95	3,54	4,13	4,72	5,31	5,90	6,49	7,08	7,67	8,26	8,85	9,44	10,03	10,63	11,21	11,80
16	3,15	3,78	4,41	5,04	5,67	6,30	6,93	7,55	8,18	8,81	9,44	10,07	10,71	11,33	11,96	12,59
17	3,34	4,01	4,68	5,35	6,02	6,69	7,36	8,03	8,70	9,36	10,03	10,71	11,37	12,04	12,71	13,38
18	3,54	4,25	4,96	5,67	6,37	7,08	7,79	8,50	9,21	9,92	10,62	11,33	12,03	12,75	13,46	14,17
19	3,74	4,49	5,23	5,98	6,73	7,48	8,22	8,97	9,72	10,46	11,21	11,97	12,71	13,46	14,20	14,95
20	3,93	4,72	5,51	6,30	7,08	7,87	8,66	9,44	10,23	11,02	11,80	12,59	13,38	14,17	14,95	15,74
21	4,13	4,96	5,78	6,61	7,44	8,26	9,09	9,92	10,75	11,57	12,39	13,22	14,04	14,85	15,70	16,53
22	4,33	5,19	6,06	6,92	7,79	8,66	9,52	10,39	11,25	12,12	12,98	13,85	14,72	15,58	16,45	17,31
23	4,52	5,43	6,33	7,24	8,15	9,05	9,96	10,86	11,76	12,67	13,57	14,48	15,40	16,29	17,19	18,10
24	4,72	5,67	6,61	7,55	8,50	9,44	10,39	11,33	12,28	13,22	14,16	15,11	16,06	17,00	17,94	18,88
25	4,92	5,90	6,89	7,87	8,85	9,84	10,82	11,81	12,78	13,77	14,75	15,74	16,72	17,71	18,68	19,67

C 4

PLATS EN ACIER (POIDS SPÉCIFIQUE 7,85)
MESURES EN POUCE ANGLAIS (1 pouce = 25,4 mm)
POIDS D'UN MÈTRE EN KG

(pour les épaisseurs et les largeurs plus fortes additionner les chiffres des épaisseurs et largeurs totalisant la dimension cherchée)

Épaisseur en pouces	Largeur en pouces							
	1/4	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2
1/4	0,316	0,633	0,949	1,266	1,582	1,899	2,215	2,532
5/16	0,396	0,791	1,187	1,582	1,978	2,373	2,768	3,164
3/8	0,475	0,949	1,424	1,899	2,373	2,848	3,322	3,797
7/16	0,554	1,108	1,661	2,215	2,768	3,322	3,876	4,430
1/2	0,633	1,266	1,899	2,532	3,164	3,797	4,430	5,063
9/16	0,712	1,424	2,136	2,848	3,560	4,272	4,984	5,696
5/8	0,791	1,582	2,373	3,164	3,956	4,747	5,538	6,329
11/16	0,870	1,740	2,611	3,481	4,351	5,221	6,091	6,962
3/4	0,949	1,899	2,848	3,797	4,747	5,696	6,645	7,595
13/16	1,028	2,057	3,085	4,114	5,142	6,171	7,199	8,227
7/8	1,108	2,215	3,322	4,430	5,538	6,645	7,753	8,860
15/16	1,187	2,373	3,560	4,747	5,933	7,120	8,307	9,493
1	1,266	2,532	3,797	5,063	6,329	7,595	8,860	10,126

C 5

BARRES RONDES, CARRÉES ET HEXAGONALES EN ACIER (POIDS SPÉCIFIQUE 7,85) — POIDS D'UN MÈTRE EN KG

(pour les dimensions inférieures ou intermédiaires prendre les sous-multiples ou les multiples des dimensions)

Dimension en mm	Ronds	Carrés	Hexagones (entre plats)
4	0,10	0,13	0,11
4,5	0,13	0,16	0,14
5	0,15	0,20	0,17
6	0,22	0,28	0,24
7	0,30	0,39	0,33
8	0,40	0,50	0,44
9	0,50	0,64	0,55
10	0,62	0,79	0,68
11	0,75	0,95	0,82
12	0,89	1,13	0,98
13	1,04	1,33	1,15
14	1,21	1,54	1,33
15	1,39	1,77	1,53
16	1,58	2,01	1,74
17	1,78	2,27	1,97
18	2,00	2,54	2,20
19	2,23	2,83	2,45
20	2,47	3,14	2,72
21	2,72	3,46	3,00
22	2,98	3,80	3,29
23	3,26	4,15	3,60
24	3,55	4,52	3,91
25	3,85	4,91	4,25
26	4,17	5,31	4,60
27	4,80	5,72	4,96
28	4,83	6,15	5,33
29	5,19	6,60	5,72
30	5,55	7,06	6,12
32	6,31	8,04	6,96
34	7,13	9,08	7,86
35	7,53	9,61	8,33
36	8,00	10,17	8,81
38	8,90	11,34	9,81
40	9,86	12,60	10,88
41	10,36	13,20	11,42
42	10,88	13,85	12,00
44	11,94	15,30	13,16
45	12,48	15,90	13,77
46	13,05	16,61	14,39
48	14,21	18,09	15,66
50	15,41	19,63	17,00
52	16,67	21,23	18,38
54	17,98	22,89	19,82
55	18,65	23,75	20,60
56	19,34	24,62	21,32
58	20,74	26,41	21,47
60	22,20	28,26	24,47
62	23,70	30,17	26,13
64	25,25	32,15	27,85

Dimension en mm	Ronds	Carrés	Hexagones (entre plats)
65	26,05	33,16	28,80
66	26,86	34,20	29,61
68	28,51	36,30	31,44
70	30,21	38,47	33,31
72	31,96	40,69	35,24
74	33,76	42,99	37,23
75	34,68	44,16	38,25
76	35,61	45,34	39,27
78	37,51	47,76	41,36
80	39,46	50,24	43,51
85	44,45	56,72	49,12
90	49,95	63,59	55,07
95	55,64	70,85	61,36
100	61,95	78,50	67,98
105	67,97	86,55	74,95
110	74,60	94,99	82,40
115	81,54	103,82	89,91
120	88,78	113,04	97,90
125	96,33	122,66	106,22
130	104,20	132,66	114,89
135	112,36	143,07	123,90
140	120,84	153,86	133,25
145	129,63	165,05	142,93
150	138,72	176,63	152,96
155	148,10	188,60	163,80
160	157,80	201,00	174,00
165	167,90	213,70	185,10
170	178,20	226,90	196,50
175	188,80	240,40	208,20
180	199,80	254,30	220,30
185	211,00	268,70	232,60
190	222,60	283,40	245,40
195	234,40	298,40	258,50
200	246,60	314,00	272,00
210	271,90	346,20	299,80
220	298,40	380,00	329,00
230	326,20	415,30	344,00
240	355,10	452,20	391,60
250	385,30	490,60	424,90
260	416,80	530,70	459,60
280	483,40	615,40	533,00
300	554,90	706,50	611,80
325	651,20	829,20	718,00
350	755,00	962,00	834,00
375	869,00	1107,00	958,00
400	988,00	1256,00	1088,00
450	1248,00	1590,00	1379,00
500	1541,00	1963,00	1700,00

C 6

TOLES PLANES EN ACIER INOXYDABLE - POIDS EN KG POUR 1 m²

ÉPAISSEUR en mm	NUANCES		ÉPAISSEUR en mm	NUANCES	
	au chrome densité 7,7	au chrome-nickel densité 7,9		au chrome densité 7,7	au chrome-nickel densité 7,9
0,3	2,31	2,37	5,0	38,50	39,50
0,4	3,08	3,16	6,0	46,20	47,40
0,5	3,85	3,95	7,0	53,90	55,30
0,6	4,62	4,74	8,0	61,60	63,20
0,7	5,39	5,53	9,0	69,30	71,10
0,8	6,16	6,32	10,0	77,00	79,00
0,9	6,93	7,11	12,0	92,40	94,80
1,0	7,70	7,90	15,0	115,50	118,50
1,2	9,24	9,48	18,0	138,60	142,20
1,5	11,55	11,85	20,0	154,00	158,00
1,8	13,86	14,22	22,0	169,40	173,80
2,0	15,40	15,80	25,0	192,50	197,50
2,5	19,25	19,75	28,0	215,60	221,20
3,0	23,10	23,70	30,0	231,00	237,00
4,0	30,80	31,60			

C 7

TUBES EN ACIER INOXYDABLE AUSTÉNITIQUE - POIDS D'UN MÈTRE EN KG

Épaisseur mm / ∅ extérieur	1	1,6	2	2,3	2,6	3,2	3,6	4	4,5	4,85	5	5,6
6	0,125											
8	0,175											
10,2	0,230		0,411									
12	0,275											
13,5	0,313	0,477		0,645	0,710							
14	0,326											
16	0,376											
17,2	0,406	0,625		0,858	0,950							
18	0,426											
20	0,476											
21,3	0,509	0,789			1,220							
22	0,526											
25	0,601											
26,9		1,010	1,250		1,580	1,905						
31,8	0,771											
33,7		1,290	1,590		2,020	2,440		2,975				
38	0,926											
42,4	1,038	1,630	2,020		2,590	3,140		3,855				
48,3		1,870	2,320		2,980	3,610		4,440				
51	1,250	1,980										
54		2,100										
60,3		2,350	2,920		3,760	4,570	5,110		6,290			
63,5		2,480										
76,1		2,980	3,710		4,790	5,850	6,540		8,070			
88,9		3,500	4,350		5,620	6,870		8,500		10,210		
101,6								9,780		11,750		
114,3			5,620		7,280		9,980		12,370			15,240
139,7			6,900		8,940					16,380		18,800
168,3			8,330		10,900							
219,1			10,870		14,100			21,550			26,800	

Les poids soulignés correspondent aux dimensions couramment fabriquées.

D 1

ALPHABET GREC

A	α	*alpha*	a	N	ν	*nu*	n
B	β	*bêta*	b	Ξ	ξ	*ksi*	ks
Γ	γ	*gamma*	c	O	o	*omicron*	o
Δ	δ	*delta*	d	Π	π	*pi*	p
E	ε	*epsilon*	e	P	ρ	*rô*	r
Z	ζ	*dzéta*	dz	Σ	σ	*sigma*	s
H	η	*êta*	ê	T	τ	*tau*	t
Θ	θ	*thêta*	t aspiré (th)	Υ	μ	*upsilon*	u
I	ι	*iota*	i	Φ	φ	*phi*	p aspiré (ph)
K	κ	*kappa*	k	X	χ	*khi*	k aspiré (ch)
Λ	λ	*lambda*	l	Ψ	ψ	*psi*	ps
M	μ	*mu*	m	Ω	ω	*oméga*	o

D 2

CONSTANTES MATHÉMATIQUES

Constante	c	$\frac{1}{c}$	log c	$\sqrt{c}$	$\sqrt[3]{c}$
π	3,1416	0,318	0,497	1,772	1,465
$\frac{\pi}{2}$	1,5708	0,637	0,196	1,253	1,162
2π	6,2832	0,159	0,798	2,507	1,845
e	2,7182	0,368	0,434	1,649	1,396
$\sqrt{2}$	1,4142	0,707	0,151		
$\sqrt{3}$	1,7321	0,577	0,239		
$\sqrt[3]{2}$	1,2599				
$\sqrt[3]{3}$	1,4422				

D 3

CONVERSION DES UNITÉS DE MESURES ANGLAISES EN UNITÉS MÉTRIQUES

Désignation anglaise des unités	Coefficient multiplicateur n pour obtenir l'unité métrique	Unité métrique	Coefficient multiplicateur de l'unité métrique $\frac{1}{n}$ pour obtenir l'unité anglaise	Emploi de l'unité
1 ton per square inch ..... brit.	1,575	kgf/mm²	0,635	Résistance mécanique
1 ton per square inch ..... USA	1,406	kgf/mm²	0,712	Résistance mécanique
1 pound per acre	1,12	kg/ha	0,89	Consommation d'engrais
1 000 pounds per square inch	0,7	kgf/mm²	1,42	Résistance mécanique
1 pound per square inch	0,0703	kgf/cm²	14,22	Pressions de gaz
1 pound per square yard	0,5425	kgf/m²	1,842	Poids des tissus et papiers
1 pound per square foot	4,88	kgf/m²	0,204	Poids des tissus et papiers
1 ounce per square yard	33,8	g/m²	0,03	Pressions faibles
1 ounce per square foot	306	g/m²	0,003	Pressions faibles
1 ounce per square inch	4,4	g/cm²	0,227	Pressions de gaz
1 pound per cubic foot	16,0	kgf/m³	0,062	Poids spécifiques des gaz
1 ounce per cubic foot	1,00	kgf/m³	1,00	Poids spécifiques des gaz
1 grain per cubic foot	2,29	g/m³	0,436	Poids spécifiques
1 grain per gallon ..... brit.	14,3	g/m³	0,07	Corps étrangers dans un liquide
1 grain per gallon ..... USA	17,12	g/m³	0,058	Corps étrangers dans un liquide
1 pound per yard	0,496	kg/m	2,02	Poids des profilés, rails, etc.
1 pound per foot	1,49	kg/m	0,666	Poids des profilés, rails, etc.
1 pound per inch	17,9	kg/m	0,056	Poids des profilés, rails, etc.
1 pound per ton ..... brit.	0,447	kg/t	2,24	Teneurs des minerais
1 pound per ton ..... USA	0,5	kg/t	2,0	Teneurs des minerais
1 pound per ounce	16	kg/kg	0,062	Teneurs des minerais
1 pound per horse-power	0,4475	kg/CV	2,23	Consommations de combustible
1 pound per ton-mile ..... brit.	0,277	kg/kmt	3,61	Consommations de combustible
1 pound per ton-mile ..... USA	0,308	kg/kmt	3,2	Consommations de combustible
1 pound per gallon ..... brit.	100	g/litre	0,01	Solutions
1 pound per gallon ..... USA	120	kg/m³	0,008	Solutions
1 quart per mile USA	0,59	litres/km	1,696	Consommation d'essence
1 gallon per mile ..... brit.	2,82	litres/km	0,354	Consommation d'essence
1 gallon per mile ..... USA	2,36	litres/km	0,423	Consommation d'essence
1 gallon per cubic foot ..... brit.	0,16	litres/dm³	6,25	Liquide ou gaz
1 gallon per cubic foot ..... USA	0,133	litres/dm³	7,51	Liquide ou gaz
1 gallon per square yard ... brit.	5,44	litres/m²	0,184	Goudronnage des routes
1 gallon per square yard ... USA	4,57	litres/m²	0,218	Goudronnage des routes
1 foot-ton ..... brit.	310	kgf/m	0,003	Énergie de chute, etc.
1 foot-ton ..... USA	277	kgf/m	0,003	Énergie de chute, etc.
1 foot-ton per square inch .. brit.	0,48	kgf.m/mm²	2,08	Résilience
1 foot-ton per square inch .. USA	0,428	kgf.m/mm²	2,34	Résilience
1 ton-inch per cubic inch ... brit.	1,575	kgf.m/cm³	0,635	Travail de déformation
1 ton-inch per cubic inch ... USA	1,408	kgf.m/cm³	0,71	Travail de déformation
1 foot-pound	0,138	kgf.m	7,233	Travail, énergie
1 inch-pound	1,15	kgf.cm	0,868	Travail, énergie
1 British Thermal Unit (BTU)	0,252	kcal	3,97	Quantité de chaleur
1 BTU per pound	0,555	kcal/kg	1,8	Pouvoir calorifique, chaleur spécifique
1 BTU per cubic foot	8,90	kcal/m³	0,113	Pouvoir calorifique, chaleur spécifique
1 BTU per square foot	2,71	kcal/m²	0,368	Rayonnement de chaleur spécifique
1 BTU per square foot per hour per °F	4,88	kcal/m².h.°C	2,05	Rayonnement de chaleur spécifique
1 BTU per sq. foot per foot per hr per °F	16	kcal/m³.h.°C	0,062	Rayonnement de chaleur spécifique
1 BTU per foot per hour per °F	1,49	kcal/m.h.°C	0,671	Transmission de chaleur par parois
1 BTU per inch per sq. inch per hr per °F	0,277	kcal/cm.cm².h.°C	3,60	Transmission de chaleur par parois
1 candle-foot	11,78	lux	0,085	Éclairage
1 candle per square inch	0,155	bougie/cm²	6,45	Éclairement
1 ohm per cubic inch	2,54	ohm/cm	0,394	Résistance électrique de l'eau
1 kiloline per square inch	155	gauss	0,006	Intensité du champ magnétique
100 feet per minute	0,508	m/s	1,97	Vitesse de coupe et de levage

D 4

CONVERSION DES DEGRÉS CELSIUS EN DEGRÉS FAHRENHEIT

(Table Albert Sauveur)

- *Pour transformer des °C en °F,* prendre la valeur dans la colonne médiane (entre la colonne C et la colonne F) et *lire l'équivalent en °F dans la colonne de droite.*
- *Pour transformer des °F en °C,* prendre la valeur dans la colonne médiane (entre la colonne C et la colonne F) et *lire l'équivalent en °C dans la colonne de gauche.*

VOIR TABLEAU CI-APRÈS

— 459.4 à 0			0 à 100						100 à 1000					
C		F	C		F	C		F	C		F	C		F
— 273	— 459.4		— 17.8	0	32	10.0	50	122.0	38	100	212	260	500	932
— 268	— 450		— 17.2	1	33.8	10.6	51	123.8	43	110	230	266	510	950
— 262	— 440		— 16.7	2	35.6	11.1	52	125.6	49	120	248	271	520	968
— 257	— 430		— 16.1	3	37.4	11.7	53	127.4	54	130	266	277	530	986
— 251	— 420		— 15.6	4	39.2	12.2	54	129.2	60	140	284	282	540	1004
— 246	— 410		— 15.0	5	41.0	12.8	55	131.0	66	150	302	288	550	1022
— 240	— 400		— 14.4	6	42.8	13.3	56	132.8	71	160	320	293	560	1040
— 234	— 390		— 13.9	7	44.6	13.9	57	134.6	77	170	338	299	570	1058
— 229	— 380		— 13.3	8	46.4	14.4	58	136.4	82	180	356	304	580	1076
— 223	— 370		— 12.8	9	48.2	15.0	59	138.2	88	190	374	310	590	1094
— 218	— 360		— 12.2	10	50.0	15.6	60	140.0	93	200	392	316	600	1112
— 212	— 350		— 11.7	11	51.8	16.1	61	141.8	99	210	410	321	610	1130
— 207	— 340		— 11.1	12	53.6	16.7	62	143.6	100	212	413.6	327	620	1148
— 201	— 330		— 10.6	13	55.4	17.2	63	145.4	104	220	428	332	630	1166
— 196	— 320		— 10.0	14	57.2	17.8	64	147.2	110	230	446	338	640	1184
— 190	— 310		— 9.4	15	59.0	18.3	65	149.0	116	240	464	343	650	1202
— 184	— 300		— 8.9	16	60.8	18.9	66	150.8	121	250	482	349	660	1220
— 179	— 290		— 8.3	17	62.6	19.4	67	152.6	127	260	500	354	670	1238
— 173	— 280		— 7.8	18	64.4	20.0	68	154.4	132	270	518	360	680	1256
— 169	— 273	— 459.4	— 7.2	19	66.2	20.6	69	156.2	138	280	536	366	690	1274
— 168	— 270	— 454	— 6.7	20	68.0	21.1	70	158.0	143	290	554	371	700	1292
— 162	— 260	— 436	— 6.1	21	69.8	21.7	71	159.8	149	300	572	377	710	1310
— 157	— 250	— 418	— 5.6	22	71.6	22.2	72	161.6	154	310	590	382	720	1328
— 151	— 240	— 400	— 5.0	23	73.4	22.8	73	163.4	160	320	608	388	730	1346
— 146	— 230	— 382	— 4.4	24	75.2	23.3	74	165.2	166	330	626	393	740	1364
— 140	— 220	— 364	— 3.9	25	77.0	23.9	75	167.0	171	340	644	399	750	1382
— 134	— 210	— 346	— 3.3	26	78.8	24.4	76	168.8	177	350	662	404	760	1400
— 129	— 200	— 328	— 2.8	27	80.6	25.0	77	170.6	182	360	680	410	770	1418
— 123	— 190	— 310	— 2.2	28	82.4	25.6	78	172.4	188	370	698	416	780	1436
— 118	— 180	— 292	— 1.7	29	84.2	26.1	79	174.2	193	380	716	421	790	1454
— 112	— 170	— 274	— 1.1	30	86.0	26.7	80	176.0	199	390	734	427	800	1472
— 107	— 160	— 256	— 0.6	31	87.8	27.2	81	177.8	204	400	752	432	810	1490
— 101	— 150	— 238	0.0	32	89.6	27.8	82	179.6	210	410	770	438	820	1508
— 96	— 140	— 220	0.6	33	91.4	28.3	83	181.4	216	420	788	443	830	1526
— 90	— 130	— 202	1.1	34	93.2	28.9	84	183.2	221	430	806	449	840	1544
— 84	— 120	— 184	1.7	35	95.0	29.4	85	185.0	227	440	824	454	850	1562
— 79	— 110	— 166	2.2	36	96.8	30.0	86	186.8	232	450	842	460	860	1580
— 73	— 100	— 148	2.8	37	98.6	30.6	87	188.6	238	460	860	466	870	1598
— 68	— 90	— 130	3.3	38	100.4	31.1	88	190.4	243	470	878	471	880	1616
— 62	— 80	— 112	3.9	39	102.2	31.7	89	192.2	249	480	896	477	890	1634
— 57	— 70	— 94	4.4	40	104.0	32.2	90	194.0	254	490	914	482	900	1652
— 51	— 60	— 76	5.0	41	105.8	32.8	91	195.8				488	910	1670
— 46	— 50	— 58	5.6	42	107.6	33.3	92	197.6				493	920	1688
— 40	— 40	— 40	6.1	43	109.4	33.9	93	199.4				499	930	1706
— 34	— 30	— 22	6.7	44	111.2	34.4	94	201.2				504	940	1724
— 29	— 20	— 4	7.2	45	113.0	35.0	95	203.0				510	950	1742
— 23	— 10	14	7.8	46	114.8	35.6	96	204.8				516	960	1760
— 17.8	0	32	8.3	47	116.6	36.1	97	206.6				521	970	1778
			8.9	48	118.4	36.7	98	208.4				527	980	1796
			9.4	49	120.2	37.2	99	210.2				532	990	1814
						37.8	100	212.0				538	1000	1832

1000 à 2000						2000 à 3000					
C		F	C		F	C		F	C		F
538	1000	1832	816	1500	2732	1093	2000	3632	1371	2500	4532
543	1010	1850	821	1510	2750	1099	2010	3650	1377	2510	4550
549	1020	1868	827	1520	2768	1104	2020	3668	1382	2520	4568
554	1030	1886	832	1530	2786	1110	2030	3686	1388	2530	4586
560	1040	1904	838	1540	2804	1116	2040	3704	1393	2540	4604
566	1050	1922	843	1550	2822	1121	2050	3722	1399	2550	4622
571	1060	1940	849	1560	2840	1127	2060	3740	1404	2560	4640
577	1070	1958	854	1570	2858	1132	2070	3758	1410	2570	4658
582	1080	1976	860	1580	2876	1138	2080	3776	1416	2580	4676
588	1090	1994	866	1590	2894	1143	2090	3794	1421	2590	4694
593	1100	2012	871	1600	2912	1149	2100	3812	1427	2600	4712
599	1110	2030	877	1610	2930	1154	2110	3830	1432	2610	4730
604	1120	2048	882	1620	2948	1160	2120	3848	1438	2620	4748
610	1130	2066	888	1630	2966	1166	2130	3866	1443	2630	4766
616	1140	2084	893	1640	2984	1171	2140	3884	1449	2640	4784
621	1150	2102	899	1650	3002	1177	2150	3902	1454	2650	4802
627	1160	2120	904	1660	3020	1182	2160	3920	1460	2660	4820
632	1170	2138	910	1670	3038	1188	2170	3938	1466	2670	4838
638	1180	2156	916	1680	3056	1193	2180	3956	1471	2680	4856
643	1190	2174	921	1690	3074	1199	2190	3974	1477	2690	4874
649	1200	2192	927	1700	3092	1204	2200	3992	1482	2700	4892
654	1210	2210	932	1710	3110	1210	2210	4010	1488	2710	4910
660	1220	2228	938	1720	3128	1216	2220	4028	1493	2720	4928
666	1230	2246	943	1730	3146	1221	2230	4046	1499	2730	4946
671	1240	2264	949	1740	3164	1227	2240	4064	1504	2740	4964
677	1250	2282	954	1750	3182	1232	2250	4082	1510	2750	4982
682	1260	2300	960	1760	3200	1238	2260	4100	1516	2760	5000
688	1270	2318	966	1770	3218	1243	2270	4118	1521	2770	5018
693	1280	2336	971	1780	3236	1249	2280	4136	1527	2780	5036
699	1290	2354	977	1790	3254	1254	2290	4154	1532	2790	5054
704	1300	2372	982	1800	3272	1260	2300	4172	1538	2800	5072
710	1310	2390	988	1810	3290	1266	2310	4190	1543	2810	5090
716	1320	2408	993	1820	3308	1271	2320	4208	1549	2820	5108
721	1330	2426	999	1830	3326	1277	2330	4226	1554	2830	5126
727	1340	2444	1004	1840	3344	1282	2340	4244	1560	2840	5144
732	1350	2462	1010	1850	3362	1288	2350	4262	1566	2850	5162
738	1360	2480	1016	1860	3380	1293	2360	4280	1571	2860	5180
743	1370	2498	1021	1870	3398	1299	2370	4298	1577	2870	5198
749	1380	2516	1027	1880	3416	1304	2380	4316	1582	2880	5216
754	1390	2534	1032	1890	3434	1310	2390	4334	1588	2890	5234
760	1400	2552	1038	1900	3452	1316	2400	4352	1593	2900	5252
766	1410	2570	1043	1910	3470	1321	2410	4370	1599	2910	5270
771	1420	2588	1049	1920	3488	1327	2420	4388	1604	2920	5288
777	1430	2606	1054	1930	3506	1332	2430	4406	1610	2930	5306
782	1440	2624	1060	1940	3524	1338	2440	4424	1616	2940	5324
788	1450	2642	1066	1950	3542	1343	2450	4442	1621	2950	5342
793	1460	2660	1071	1960	3560	1349	2460	4460	1627	2960	5360
799	1470	2678	1077	1970	3578	1354	2470	4478	1632	2970	5378
804	1480	2696	1082	1980	3596	1360	2480	4496	1638	2980	5396
810	1490	2714	1088	1990	3614	1366	2490	4514	1643	2990	5414
			1093	2000	3632				1649	3000	5432

D 5

CONVERSION DES LIVRES ANGLAISES (POUNDS) EN KILOGRAMMES

Pound (lb)	kg	Pound (lb)	kg	Pound (lb)	kg
1	0,454	36	16,329	71	32,205
2	0,907	37	16,783	72	32,658
3	1,361	38	17,236	73	33,112
4	1,814	39	17,690	74	33,566
5	2,268	40	18,144	75	34,019
6	2,722	41	18,597	76	34,473
7	3,175	42	19,051	77	34,926
8	3,629	43	19,504	78	35,380
9	4,082	44	19,958	79	35,834
10	4,536	45	20,412	80	36,287
11	4,989	46	20,865	81	36,741
12	5,443	47	21,319	82	37,194
13	5,897	48	21,772	83	37,648
14	6,350	49	22,226	84	38,102
15	6,804	50	22,680	85	38,555
16	7,257	51	23,133	86	39,009
17	7,711	52	23,587	87	39,462
18	8,165	53	24,040	88	39,916
19	8,618	54	24,494	89	40,370
20	9,072	55	24,947	90	40,823
21	9,525	56	25,401	91	41,277
22	9,979	57	25,855	92	41,730
23	10,433	58	26,308	93	42,184
24	10,886	59	26,762	94	42,637
25	11,340	60	27,215	95	43,091
26	11,793	61	27,669	96	43,545
27	12,247	62	28,123	97	43,998
28	12,701	63	28,576	98	44,452
29	13,154	64	29,030	99	44,905
30	13,608	65	29,483	100	45,359
31	14,061	66	29,937		
32	14,515	67	30,391		
33	14,968	68	30,844		
34	15,422	69	31,298		
35	15,876	70	31,751		

D 6

CONVERSION DES PIEDS ANGLAIS (FEET) EN MÈTRES

Foot	Mètre	Foot	Mètre	Foot	Mètre
1	0,3048	36	10,9728	71	21,6408
2	0,6096	37	11,2776	72	21,9456
3	0,9144	38	11,5824	73	22,2504
4	1,2192	39	11,8872	74	22,5552
5	1,5240	40	12,1920	75	22,8600
6	1,8288	41	12,4968	76	23,1648
7	2,1336	42	12,8016	77	23,4696
8	2,4384	43	13,1064	78	23,7744
9	2,7432	44	13,4112	79	24,0792
10	3,0480	45	13,7160	80	24,3840
11	3,3528	46	14,0208	81	24,6888
12	3,6576	47	14,3256	82	24,9936
13	3,9624	48	14,6304	83	25,2984
14	4,2672	49	14,9352	84	25,6032
15	4,5720	50	15,2400	85	25,9080
16	4,8769	51	15,5448	86	26,2128
17	5,1816	52	15,8496	87	26,5176
18	5,4864	53	16,1544	88	26,8224
19	5,7912	54	16,4592	89	27,1272
20	6,0960	55	16,7640	90	27,4320
21	6,4008	56	17,0688	91	27,7368
22	6,7056	57	17,3736	92	28,0416
23	7,0104	58	17,6784	93	28,3464
24	7,3152	59	17,9832	94	28,6512
25	7,6200	60	18,2880	95	28,9560
26	7,9248	61	18,5928	96	29,2608
27	8,2296	62	18,8976	97	29,5656
28	8,5344	63	19,2024	98	29,8704
29	8,8392	64	19,5072	99	30,1752
30	9,1440	65	19,8120	100	30,4800
31	9,4488	66	20,1168		
32	9,7536	67	20,4216		
33	10,0584	68	20,7264		
34	10,3632	69	21,0312		
35	10,6680	70	21,3360		

D 7

CONVERSION DES MILLIMÈTRES EN FRACTIONS DÉCIMALES DE POUCE ANGLAIS

mm	décimales de pouce
1	.03937
2	.07874
3	.11811
4	.15847
5	.19685
6	.23622
7	.27559
8	.31496
9	.35433
10	.39370
11	.43307
12	.47244
13	.51181
14	.55118
15	.59055
16	.62992
17	.66929
18	.70866
19	.74803
20	.78740
21	.82677
22	.86614
23	.90551
24	.94488
25	.98425
25,4	1.00000

D 8

CONVERSION DES FRACTIONS DÉCIMALES DE POUCE ANGLAIS EN MILLIMÈTRE

Pouce	Millimètre
0,01	0,254
0,02	0,508
0,03	0,762
0,04	1,016
0,05	1,270
0,06	1,524
0,07	1,778
0,08	2,032
0,09	2,286
0,1	2,540
0,2	5,080
0,3	7,620
0,4	10,160
0,5	12,700
0,6	15,240
0,7	17,780
0,8	20,320
0,9	22,860
1	25,4

D 9

CONVERSION DES FRACTIONS DE POUCE ANGLAIS EN VALEUR DÉCIMALE ET EN MILLIMÈTRE

Fractions de pouce	millimètre
1/64 = 0,015625	0,397
1/32 = 0,03125	0,794
3/64 = 0,046875	1,191
1/16 = 0,0625	1,588
5/64 = 0,078125	1,984
3/32 = 0,09375	2,381
7/64 = 0,109375	2,778
1/8 = 0,125	3,175
9/64 = 0,140625	3,572
5/32 = 0,15625	3,969
11/64 = 0,171875	4,366
3/16 = 0,1875	4,763
13/64 = 0,203125	5,159
7/32 = 0,21875	5,556
15/64 = 0,234375	5,953
1/4 = 0,25	6,350
17/64 = 0,265625	6,747
9/32 = 0,28125	7,144
19/64 = 0,296875	7,541
5/16 = 0,3125	7,938
21/64 = 0,328125	8,334
11/32 = 0,34375	8,731
23/64 = 0,359375	9,128
3/8 = 0,375	9,525
25/64 = 0,390625	9,922
13/32 = 0,40625	10,319
27/64 = 0,421875	10,716
7/16 = 0,4375	11,113
29/64 = 0,453125	11,509
15/32 = 0,46875	11,906
31/64 = 0,484375	12,303
1/2 = 0,5	12,700

Fractions de pouce	millimètre
33/64 = 0,515625	13,097
17/32 = 0,53125	13,494
35/64 = 0,546875	13,891
9/16 = 0,5625	14,288
37/64 = 0,578125	14,684
19/32 = 0,59375	15,081
39/64 = 0,609375	15,478
5/8 = 0,625	15,875
41/64 = 0,640625	16,272
21/32 = 0,65625	16,669
43/64 = 0,671875	17,066
11/16 = 0,6875	17,463
45/64 = 0,703125	17,859
23/32 = 0,71875	18,256
47/64 = 0,734375	18,653
3/4 = 0,75	19,050
49/64 = 0,765625	19,447
25/32 = 0,78152	19,844
51/64 = 0,796875	20,241
13/16 = 0,8125	20,638
53/64 = 0,828125	21,034
27/32 = 0,84375	21,431
55/64 = 0,859375	21,828
7/8 = 0,875	22,225
57/64 = 0,890625	22,622
29/32 = 0,90625	23,019
59/64 = 0,921875	23,416
15/16 = 0,9375	23,813
61/64 = 0,953125	24,209
31/32 = 0,96875	24,606
63/64 = 0,984375	25,003
1 = 1,000	25,400

D 10

CONVERSION DE POUCES CARRÉS EN CENTIMÈTRES CARRÉS

Pouce²	cm²
1	6,4516
2	12,9032
3	19,3548
4	25,8064
5	32,2580
6	38,7096
7	45,1612
8	51,6128
9	58,0644
10	64,5160
11	70,9676
12	77,4192
13	83,8708
14	90,3224
15	96,7740
16	103,2256
17	109,6772
18	116,1288
19	122,5804
20	129,0320
21	135,4836
22	141,9352
23	148,3868
24	154,8384
25	161,2900
26	167,7416
27	174,1932
28	180,6448
29	187,0964
30	193,5480
31	199,9996
32	206,4512
33	212,9028
34	219,3544
35	225,8060

Pouce²	cm²
36	232,2576
37	238,7092
38	245,1608
39	251,6124
40	258,0640
41	264,5156
42	270,9672
43	277,4188
44	283,8704
45	290,3220
46	296,7736
47	303,2252
48	309,6768
49	316,1284
50	322,5800
51	329,0316
52	335,4832
53	341,9348
54	348,3864
55	354,8380
56	361,2896
57	367,7412
58	374,1928
59	380,6444
60	387,0960
61	393,5476
62	399,9992
63	406,4508
64	412,9024
65	419,3540
66	425,8056
67	432,2572
68	438,7088
69	445,1604
70	451,6120

Pouce²	cm²
71	458,0636
72	464,5152
73	470,9668
74	477,4184
75	483,8700
76	490,3216
77	496,7732
78	503,2248
79	509,6764
80	516,1280
81	522,5796
82	529,0312
83	535,4828
84	541,9344
85	548,3860
86	554,8376
87	561,2892
88	567,7408
89	574,1924
90	580,6440
91	587,0956
92	593,5472
93	599,9988
94	606,4504
95	612,9020
96	619,3536
97	625,8052
98	632,2568
99	638,7084
100	645,1600

D 11

CONVERSION DE POUCES CUBES EN CENTIMÈTRES CUBES

Pouce³	cm³
1	16,3871
2	32,7741
3	49,1612
4	65,5483
5	81,9353
6	98,3224
7	114,7094
8	131,0965
9	147,4836
10	163,8706
11	180,2577
12	196,6448
13	213,0318
14	229,4189
15	245,8060
16	262,1930
17	278,5801
18	294,9672
19	311,3542
20	327,7413
21	344,1283
22	360,5154
23	376,9025
24	393,2895
25	409,6766
26	426,0637
27	442,4507
28	458,8378
29	475,2249
30	491,6119
31	507,9990
32	524,3860
33	540,7731
34	557,1602
35	573,5472
36	589,9343
37	606,3214

Pouce³	cm³
38	622,7084
39	639,0955
40	655,4826
41	671,8696
42	688,2567
43	704,6438
44	721,0308
45	737,4179
46	753,8049
47	770,1920
48	786,5791
49	802,9661
50	819,3532
51	835,7403
52	852,1273
53	868,5144
54	884,9015
55	901,2885
56	917,6756
57	934,0626
58	950,4497
59	966,8368
60	983,2238
61	999,6109
62	1015,9980
63	1032,3850
64	1048,7721
65	1065,1592
66	1081,5462
67	1097,9333
68	1114,3204
69	1130,7074
70	1147,0945
71	1163,4815
72	1179,8686
73	1196,2557
74	1212,6427

Pouce³	cm³
75	1229,0298
76	1245,4169
77	1261,8039
78	1278,1910
79	1294,5781
80	1310,9651
81	1327,3522
82	1343,7392
83	1360,1263
84	1376,5134
85	1392,9004
86	1409,2875
87	1425,6746
88	1442,0616
89	1458,4487
90	1474,8358
91	1491,2228
92	1507,6099
93	1523,9970
94	1540,3840
95	1556,7711
96	1573,1581
97	1589,5452
98	1605,9323
99	1622,3193
100	1638,7064
110	1802,5770
120	1966,4477
130	2130,3183
140	2294,8190
150	2458,0596
160	2621,9302
170	2785,8009
180	2949,6715
190	3113,5422
200	3277,4128

D 12

CONVERSION DE PIEDS CUBES EN MÈTRES CUBES

Pied³	m³
1	0,0283
2	0,0566
3	0,0850
4	0,1133
5	0,1416
6	0,1699
7	0,1982
8	0,2265
9	0,2549
10	0,2832
11	0,3115
12	0,3398
13	0,3681
14	0,3964
15	0,4248
16	0,4531
17	0,4814
18	0,5097
19	0,5380
20	0,5663
21	0,5947
22	0,6230
23	0,6513
24	0,6796
25	0,7079
26	0,7362
27	0,7646
28	0,7929
29	0,8212
30	0,8495
31	0,8778
32	0,9061
33	0,9345
34	0,9628
35	0,9911
36	1,0194
37	1,0477

Pied³	m³
38	1,0760
39	1,1043
40	1,1327
41	1,1610
42	1,1893
43	1,2176
44	1,2459
45	1,2743
46	1,3026
47	1,3309
48	1,3592
49	1,3875
50	1,4158
51	1,4442
52	1,4725
53	1,5008
54	1,5291
55	1,5574
56	1,5857
57	1,6141
58	1,6424
59	1,6707
60	1,6990
61	1,7273
62	1,7556
63	1,7840
64	1,8123
65	1,8406
66	1,8689
67	1,8972
68	1,9255
69	1,9539
70	1,9822
71	2,0105
72	2,0388
73	2,0671
74	2,0954

Pied³	m³
75	2,1238
76	2,1521
77	2,1804
78	2,2087
79	2,2370
80	2,2653
81	2,2937
82	2,3220
83	2,3503
84	2,3786
85	2,4069
86	2,4352
87	2,4636
88	2,4919
89	2,5202
90	2,5485
91	2,5768
92	2,6051
93	2,6335
94	2,6618
95	2,6901
96	2,7184
97	2,7467
98	2,7751
99	2,8034
100	2,8317
110	3,1149
120	3,3980
130	3,6812
140	3,9644
150	4,2475
160	4,5307
170	4,8139
180	5,0970
190	5,3802
200	5,6634

D 13

CONVERSION DES VALEURS DE PRESSION (KILOGRAMME-FORCE/MM²) EN TONNES ANGLAISES PAR POUCE CARRÉ (TON PER SQUARE INCH)

kgf/mm²	Tonne par pouce carré t/sq. in
10	6,35
11	6,99
12	7,62
13	8,25
14	8,89
15	9,52
16	10,16
17	10,79
18	11,43
19	12,06
20	12,70
21	13,33
22	13,97
23	14,60
24	15,24
25	15,87
26	16,51
27	17,14
28	17,78
29	18,41
30	19,05
31	19,68
32	20,32
33	20,95
34	21,59
35	22,22
36	22,86
37	23,49
38	24,13
39	24,76
40	25,40

kgf/mm²	Tonne par pouce carré t/sq. in
41	26,03
42	26,67
43	27,30
44	27,94
45	28,57
46	29,21
47	29,84
48	30,48
49	31,11
50	31,75
51	32,38
52	33,02
53	33,65
54	34,29
55	34,92
56	35,56
57	36,19
58	36,83
59	37,46
60	38,10
61	38,73
62	39,37
63	40,00
64	40,64
65	41,27
66	41,91
67	42,54
68	43,18
69	43,81
70	44,45
71	45,08

kgf/mm²	Tonne par pouce carré t/sq. in
72	45,72
73	46,35
74	46,99
75	47,62
76	48,26
77	48,89
78	49,53
79	50,16
80	50,80
81	51,43
82	52,07
83	52,70
84	53,34
85	53,97
86	54,61
87	55,24
88	55,88
89	56,51
90	57,15
91	57,78
92	58,42
93	59,05
94	59,69
95	60,32
96	60,96
97	61,59
98	62,23
99	62,86
100	63,50

D 14

CONVERSION DES VALEURS DE PRESSION (KILOGRAMME-FORCE/MM²) EN LIVRES ANGLAISES PAR POUCE CARRÉ

kgf/mm²	Livre par pouce carré (psi)
1	1 422,3
2	2 844,7
3	4 267,0
4	5 689,3
5	7 111,7
6	8 534,0
7	9 956,3
8	11 378,7
9	12 801,0
10	14 223,4
11	15 645,7
12	17 068,0
13	18 490,4
14	19 912,7
15	21 335,0
16	22 757,4
17	24 179,7
18	25 602,0
19	27 024,4
20	28 446,7
21	29 869,0
22	31 291,4
23	32 713,7
24	34 136,0
25	35 558,4
26	36 980,7
27	38 403,0
28	39 825,4
29	41 247,7
30	42 670,1
31	44 092,4
32	45 514,7
33	46 937,1
34	48 359,4
35	49 781,7

kgf/mm²	Livre par pouce carré (psi)
36	51 204,1
37	52 626,4
38	54 048,7
39	55 471,1
40	56 893,4
41	58 315,7
42	59 738,1
43	61 160,4
44	62 582,7
45	64 005,1
46	65 427,4
47	66 849,7
48	68 272,1
49	69 694,4
50	71 116,8
51	72 539,1
52	73 961,4
53	75 383,8
54	76 806,1
55	78 228,4
56	79 650,8
57	81 073,1
58	82 495,4
59	83 917,8
60	85 340,1
61	86 762,4
62	88 184,8
63	89 607,1
64	91 029,4
65	92 451,8
66	93 874,1
67	95 296,4
68	96 718,8
69	98 141,1
70	99 563,5

kgf/mm²	Livre par pouce carré (psi)
71	100 985,8
72	102 408,1
73	103 830,5
74	105 252,8
75	106 675,1
76	108 097,5
77	109 519,8
78	110 942,1
79	112 364,5
80	113 786,8
81	115 209,1
82	116 631,5
83	118 053,8
84	119 476,1
85	120 898,5
86	122 320,8
87	123 743,1
88	125 165,5
89	126 587,8
90	128 010,2
91	129 432,5
92	130 854,8
93	132 277,2
94	133 699,5
95	135 121,8
96	136 544,2
97	137 966,5
98	139 388,8
99	140 811,2
100	142 233,5
110	156 456,9
120	170 680,2
130	184 903,6
140	199 126,9
150	213 350,3

D 15

CONVERSION DES HECTOBARS EN LIVRES ANGLAISES PAR POUCE CARRÉ

hectobar	Livre par pouce carré (psi)
1	1 450,4
2	2 900,8
3	4 351,1
4	5 801,5
5	7 251,9
6	8 702,3
7	10 152,6
8	11 603,0
9	13 053,4
10	14 503,8
11	15 954,2
12	17 404,5
13	18 854,9
14	20 305,3
15	21 755,7
16	23 206,0
17	24 656,4
18	26 106,8
19	27 557,2
20	29 007,6
21	30 457,9
22	31 908,3
23	33 358,7
24	34 809,1
25	36 259,5
26	37 709,8
27	39 160,2
28	40 610,6
29	42 061,0
30	43 511,3
31	44 961,7
32	46 412,1
33	47 862,5
34	49 312,9
35	50 763,2
36	52 213,6
37	53 664,0

hectobar	Livre par pouce carré (psi)
38	55 114,4
39	56 464,7
40	58 015,1
41	59 465,5
42	60 915,9
43	62 366,3
44	63 816,6
45	65 267,0
46	66 717,4
47	68 167,8
48	69 618,1
49	71 068,5
50	72 518,9
51	73 969,3
52	75 419,7
53	76 870,0
54	78 320,4
55	79 770,8
56	81 221,2
57	82 671,5
58	84 121,9
59	85 572,3
60	87 022,7
61	88 473,1
62	89 923,4
63	91 373,8
64	92 824,2
65	94 274,6
66	95 724,9
67	97 175,3
68	98 625,7
69	100 076,1
70	101 526,5
71	102 976,8
72	104 427,2
73	105 877,6
74	107 328,0

hectobar	Livre par pouce carré (psi)
75	108 778,4
76	110 228,7
77	111 679,1
78	113 129,5
79	114 579,9
80	116 030,2
81	117 480,6
82	118 931,0
83	120 381,4
84	121 831,8
85	123 282,1
86	124 732,5
87	126 182,9
88	127 633,3
89	129 083,6
90	130 534,0
91	131 984,4
92	133 434,8
93	134 885,2
94	136 335,5
95	137 785,9
96	139 236,3
97	140 686,7
98	142 137,0
99	143 587,4
100	145 037,8
110	159 541,6
120	174 045,4
130	188 549,1
140	203 052,9
150	217 556,7
160	232 060,5
170	246 564,3
180	261 068,0
190	275 571,8
200	290 075,6

D 16

CONVERSION DES TONNES ANGLAISES PAR POUCE CARRÉ EN KILOGRAMME-FORCE/MM²

Tonnes par pouce carré (t/sq. in)	kgf/mm²
10	15,75
11	17,32
12	18,90
13	20,47
14	22,05
15	23,62
16	25,20
17	26,77
18	28,35
19	29,92
20	31,50
21	33,07
22	34,65
23	36,22
24	37,80
25	39,37
26	40,95
27	42,52
28	44,10
29	45,67
30	47,25
31	48,82
32	50,40
33	51,97
34	53,55
35	55,12
36	56,70
37	58,27
38	59,85
39	61,42
40	63,00

Tonnes par pouce carré (t/sq. in)	kgf/mm²
41	64,57
42	66,14
43	67,72
44	69,29
45	70,87
46	72,44
47	74,02
48	75,59
49	77,17
50	78,74
51	80,32
52	81,89
53	83,47
54	85,04
55	86,62
56	88,19
57	89,77
58	91,34
59	92,92
60	94,49
61	96,07
62	97,64
63	99,22
64	100,79
65	102,37
66	103,94
67	105,52
68	107,09
69	108,67
70	110,24
71	111,82

Tonnes par pouce carré (t/sq. in)	kgf/mm²
72	113,39
73	114,97
74	116,54
75	118,12
76	119,69
77	121,27
78	122,84
79	124,42
80	125,99
81	127,56
82	129,14
83	130,71
84	132,29
85	133,86
86	135,44
87	137,01
88	138,59
89	140,16
90	141,74
91	143,31
92	144,89
93	146,46
94	148,04
95	149,61
96	151,19
97	152,76
98	154,34
99	155,91
100	157,49

D 17

CONVERSION DES VALEURS DE PRESSION EN LIVRE ANGLAISE PAR POUCE CARRÉ EN KILOGRAMME-FORCE/MM² ET EN HECTOBAR

Livre par pouce carré (psi)	kgf/mm²	Hectobar
1 000	0,70	0,69
2 000	1,40	1,38
3 000	2,11	2,07
4 000	2,81	2,76
5 000	3,51	3,45
6 000	4,22	4,14
7 000	4,92	4,83
8 000	5,62	5,52
9 000	6,33	6,21
10 000	7,03	6,89
11 000	7,73	7,58
12 000	8,44	8,27
13 000	9,14	8,96
14 000	9,84	9,65
15 000	10,55	10,34
16 000	11,25	11,03
17 000	11,95	11,72
18 000	12,65	12,41
19 000	13,36	13,10
20 000	14,06	13,79
21 000	14,76	14,48
22 000	15,47	15,17
23 000	16,17	15,86
24 000	16,87	16,55
25 000	17,58	17,24
26 000	18,28	17,93
27 000	18,98	18,62
28 000	19,68	19,31
29 000	20,39	19,99
30 000	21,09	20,68

Livre par pouce carré (psi)	kgf/mm²	Hectobar
31 000	21,80	21,37
32 000	22,45	22,06
33 000	23,20	22,75
34 000	23,90	23,44
35 000	24,61	24,13
36 000	25,31	24,82
37 000	26,01	25,51
38 000	26,71	26,20
39 000	27,42	26,89
40 000	28,12	27,58
41 000	28,82	28,27
42 000	29,53	28,96
43 000	30,23	29,65
44 000	30,93	30,34
45 000	31,64	31,03
46 000	32,34	31,72
47 000	33,04	32,41
48 000	33,75	33,09
49 000	34,45	33,78
50 000	35,15	34,47
51 000	35,86	35,16
52 000	36,56	35,85
53 000	37,26	36,54
54 000	37,96	37,23
55 000	38,67	37,92
56 000	39,37	38,61
57 000	40,07	39,30
58 000	40,78	39,99
59 000	41,48	40,68
60 000	42,18	41,37

Livre par pouce carré (psi)	kgf/mm²	Hectobar
61 000	42,89	42,06
62 000	43,59	42,75
63 000	44,29	43,44
64 000	45,00	44,13
65 000	45,70	44,82
66 000	46,40	45,51
67 000	47,10	46,19
68 000	47,81	46,88
69 000	48,50	47,57
70 000	49,21	48,26
71 000	49,92	48,95
72 000	50,62	49,64
73 000	51,32	50,33
74 000	52,03	51,02
75 000	52,73	51,71
76 000	53,43	52,40
77 000	54,13	53,09
78 000	54,84	53,78
79 000	55,54	54,47
80 000	56,24	55,16
81 000	56,95	55,85
82 000	57,65	56,54
83 000	58,35	57,23
84 000	59,06	57,92
85 000	59,76	58,61
86 000	60,46	59,29
87 000	61,17	59,98
88 000	61,87	60,67
89 000	62,57	61,36
90 000	63,27	62,05
95 000	66,79	65,50
100 000	70,31	68,95

D 18

CONVERSION DES JAUGES D'ÉPAISSEUR (AMÉRICAINES ET ANGLAISES) EN MILLIMÈTRES

NUMÉRO DE JAUGE	ÉPAISSEURS en mm		
		JAUGES BRITANNIQUES	
	U.S. Standard GAUGE (Anc.)	S.W.G. Standard Wire gauge	B.G. Birmingham gauge
3	6,35	6.40	7.12
4	5,95	5.89	6.35
5	5,56	5.39	5.65
6	5,16	4.88	5.03
7	4,76	4.47	4.48
8	4,37	4.06	3.99
9	3,97	3.66	3.55
10	3,57	3.25	3.18
11	3,18	2.95	2.83
12	2,78	2.64	2.52
13	2,38	2.34	2.24
14	1,98	2.03	1.99
15	1,79	1.83	1.78
16	1,59	1.63	1.59
17	1,43	1.42	1.41
18	1,27	1.22	1.26
19	1,11	1.02	1.12
20	0,95	0.91	0.99
21	0,87	0.81	0.89
22	0,79	0.71	0.79
23	0,71	0.61	0.71
24	0,64	0.56	0.63
25	0,56	0.51	0.56
26	0,48	0.46	0.50
27	0,44	0.42	0.44
28	0,40	0.38	0.40
29	0,36	0.35	0.35
30	0,32	0.32	0.31

UGINE KUHLMANN

Société anonyme au capital de 68.490.000 F
Siège Social : 10, rue du Général Foy - Paris 8e
R. C. Seine 55 B 12930

Tous droits de reproduction,
(texte et illustrations) réservés pour tous pays.

Les figures des pages 93, 100, 102, 109, 111, 112 et 114 sont extraites de « Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud » par MM. Castro et de Cadenet (Dunod éditeur).

ACHEVÉ D'IMPRIMER SUR LES PRESSES
DE LA S.A. HÉLIOGRAVURE ET TYPOGRAPHIE
AULARD, 35, RUE TOURNEFORT A PARIS Ve
LE 20 OCTOBRE 1969

IMPRIMÉ EN FRANCE

DÉPOT LÉGAL 4e TRIMESTRE 1969